



**Nuno Francisco Henriques Martins Ribeiro**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

# **Efeito da força de pré-esforço inicial no comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão, Professora Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Valter José da Guia Lúcio, Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão,  
Professor Associado, FCT/UNL

Arguente: Doutor Rui Pedro César Marreiros, Professor  
Auxiliar, FCT-UNL

**Outubro 2018**



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



**Efeito da força de pré-esforço inicial no comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência**

Copyright © Nuno Francisco Henriques Martins Ribeiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Começo por agradecer à professora Carla Alexandra da Cruz Marchão por toda a disponibilidade e aconselhamento provido ao longo de todo o trabalho.

Ao professor Válter José da Guia Lúcio pelo acompanhamento e a constante boa disposição.

À Helisa Muhaj por toda a ajuda oferecida, foi um grande apoio ao longo deste projeto em todos os aspetos relacionados com o trabalho laboratorial.

Ao Tiago Vilhena que se mostrou sempre disponível para me ajudar.

Ao Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL, por todo o material disponibilizado e todos os meios necessários para a realização deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório, José Gaspar e Jorge Silvério, pela contribuição prestada durante qualquer operação laboratorial requisitada.

À Hilti Portugal pelo fornecimento das brocas e das resinas necessárias para os ensaios e à VSL pelo fornecimento dos cilindros de cunhas e cordões de pré-esforço.

Por fim, agradeço aos meus pais pelo apoio constante ao longo do curso e por garantirem que nunca me faltaria nada em qualquer ocasião. À minha irmã, pelo interesse que demonstrou no meu progresso e pelo chapéu da tese. Agradeço a toda a minha família que sempre se dispôs para ajudar. À Inês, a minha namorada, que sempre me ajudou em todas as decisões importantes, pelo apoio e motivação constantes e até mesmo pelo auxílio num dos ensaios laboratoriais. Quero também agradecer ao Bruno “Xé” Fernandes, ao Roberto “Sporkio” Carvalho, ao Gabriel “Serrano” Alves, ao Rafael Serra, ao André “Poupas” Saraiva, à Magda Sá, ao Gonçalo Freitas, ao Daniel “Mestre” Madeira, à Joana Guadalupe e à Ana Elias por todos os momentos que passámos juntos, pela entreaajuda e a união constante, e por terem feito parte desta jornada tão importante da minha vida.



# Resumo

Com a generalização da utilização da técnica do pré-esforço, têm-se procurado novas soluções que permitam o reforço de elementos existentes sem alteração da sua geometria. A solução pode passar pela utilização de ancoragens de pré-esforço por aderência.

O presente trabalho aborda este conceito de ancoragens de cordões de pré-esforço com recurso a agentes de aderência à base de resinas epoxídicas. Esta é uma solução que pode ser utilizada no reforço de elementos, com facilidade de execução e apresenta a grande vantagem de não provocar alterações estéticas à estrutura.

Para este estudo utilizaram-se cordões de 15,7 mm de diâmetro nominal inseridos em furos de 18 mm. Com o objetivo de estudar o efeito da força de pré-esforço no comportamento da ancoragem, foram realizados nove ensaios, seis monotónicos e três cíclicos. Em três dos ensaios monotónicos foi aplicada uma força de pré-esforço inicial de 125 kN, nos restantes três aplicou-se uma força de pré-esforço inicial de 150 kN. A força de pré-esforço a aplicar nos ensaios cíclicos ficou dependente dos resultados dos ensaios monotónicos.

Para agente de aderência utilizou-se a resina HIT-RE 500 V3 da Hilti.

O objetivo destes ensaios foi analisar o comportamento do sistema durante a transferência de pré-esforço (*push-in*) e o arrancamento do cordão (*pull-out*).

Concluiu-se que um pré-esforço inicial de 125 kN é mais vantajoso e que a rotura se dá pela ligação aço-resina.

**Palavras-chave:** Ancoragens por aderência; Aderência; Pré-esforço; Reforço de estruturas; Resinas Epóxi.

# Abstract

With the generalization of the use of prestressing technique, new solutions have been sought to allow the reinforcement of existing elements without changing their geometry. The solution may involve the use of prestress adhesive anchors.

The present work deals with this concept of anchorages of prestress strands with the use of adhesives based on epoxy resins. This is a relatively straightforward enhancement solution that has the great advantage of not causing aesthetic changes to the structure.

For this study, 15.7 mm nominal strands inserted in 18 mm holes were used. In order to study the effect of the prestress force on the anchorage behavior, nine tests, six monotonic and three cyclic, were performed. In three of the monotonic tests an initial prestressing force of 125 kN was applied, in the remaining three an initial prestressing force of 150 kN was applied. The pre-stress force to be applied in the cyclic tests was dependent on the results of the monotonic tests.

HIT-RE 500 V3 resin from Hilti was used as the adhesive agente.

The objective of these tests was to analyze the behavior of the system during push-in transfer and pull-out. It was concluded that an initial prestressing of 125 kN is more advantageous and that the rupture occurs by the steel-resin bond

**Keywords:** Adhesion anchors; Adherence; Pre-stress; Reinforcement of structures; Epoxy Resins.



# ***ÍNDICE DE MATÉRIAS***

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Organização da tese .....	2
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>3</b>
2.1 Considerações Gerais.....	3
2.2 Pré-esforço.....	4
2.3 Materiais .....	4
2.4 Ancoragens de pré-esforço por pré-tensão .....	6
2.5 Recomendações de cálculo dos comprimentos de referência segundo o Eurocódigo 2 [8] .....	13
2.6 Ancoragens por aderência .....	16
<b>3. TRABALHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>25</b>
3.1 Introdução .....	25
3.2 Material utilizado .....	25
3.3 Preparação do ensaio .....	28
<b>4. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
4.1 Introdução .....	37
4.2 Características dos ensaios .....	37
4.3 Transferência do pré-esforço (Push-in) .....	37
4.4 Ensaio de arrancamento (Pull-out).....	43
4.5 Ensaio cíclico .....	50
4.6 Comparação com os resultados de Vilhena [4] .....	57
4.7 Carotes dos ensaios.....	59
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
5.1 Introdução .....	61
5.2 Conclusões.....	61

5.3	Desenvolvimentos futuros .....	62
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>63</b>

# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Exemplo de ancoragem por aderência.....	3
Figura 2.2 - Diagrama tensão-extensão para o aço de pré-esforço comum [8] .....	5
Figura 2.3 - Diagrama de idealizado e de cálculo de tensão-extensão para o aço de pré-esforço [8].....	6
Figura 2.4 - Variação da tensão do cordão ao longo do seu comprimento. (adaptado de [9])	7
Figura 2.5 - Distribuições da tensão de aderência ao longo do comprimento de transmissão (adaptado de [12]) .....	7
Figura 2.6 - Distribuição de tensões ao longo do comprimento de transmissão. (adaptado de [13]) .....	8
Figura 2.7 - Tensões transferidas e respectivas fendas (adaptado de [22]) .....	10
Figura 2.8 - Efeito de Hoyer .....	12
Figura 2.9 - Desenvolvimento de tensões e fendas na zona de transferência devido ao efeito de Hoyer (adaptado de [25]) .....	13
Figura 2.10 - Transferência de pré-esforço e definição dos comprimentos de referência segundo o EC-2 [8] .....	13
Figura 2.11 – Distribuição de tensões na zona de amarração: (1) no momento da libertação do pré-esforço e (2) para estados limites últimos [5] .....	16
Figura 2.12 - Efeito da temperatura na força de ligação [28] .....	17
Figura 2.13 - Localização comum de fendas em ancoragens aderentes [34] .....	18
Figura 2.14 - Modos de rotura de ancoragens aderentes: a) pelo betão, b) pelo varão; c) pela interface resina-betão; d) pela interface aço-resina.....	19
Figura 2.15 - Modos de rotura em função da tensão e do comprimento de embebimento [33] .....	19
Figura 2.16 – Relação tipo entre a tensão na ligação e o deslocamento para carregamentos cíclicos e monotónicos (adaptado de [40]) .....	21
Figura 2.17 – Fendas de ligação internas (adaptado de [41]) .....	21
Figura 2.18 – Influência do número de ciclos na relação entre a força de ligação máxima para cargas cíclicas $v_b$ e estáticas $v_{bu}$ (adaptado de [39]) .....	22
Figura 2.19 – Aumento do deslizamento na extremidade livre sob carga de pico durante a carga cíclica como função do número de repetições de carga (adaptado de [39]) .....	23
Figura 3.1 - Pormenorização de armaduras do bloco de betão [37] .....	26
Figura 3.2 - Aço de pré-esforço utilizado no trabalho .....	27
Figura 3.3 - Resina utilizada no trabalho experimental [39].....	28
Figura 3.4 - Fluxo de resina indesejado .....	29
Figura 3.5 - Selagem do cordão com plasticina e fita adesiva .....	29
Figura 3.6 - Pistola de ar comprimido e escovilhão .....	30

Figura 3.7 - Discos utilizados como referência para medição de deslocamentos: a) Face superior, b) Face inferior .....	31
Figura 3.8 - Posição das células de carga e dos defletômetros: a) Inferiores, b) Superiores.....	32
Figura 3.9 - Esquema do ensaio .....	33
Figura 3.10 - Aparelho de aquisição de dados Spider8.....	33
Figura 3.11 - Tubo de bisel cortado .....	34
Figura 3.12 - Pistola elétrica de injeção .....	35
Figura 3.13 - Excesso de resina.....	35
Figura 4.1 - Ensaio de transferência de pré-esforço de 125 kN (Relação Força - Deslocamento) .....	38
Figura 4.2 - Ensaio de transferência de pré-esforço de 150 kN (Relação Força - Deslocamento) .....	39
Figura 4.3 - Ensaio de transferência de pré-esforço cíclicos de 125 kN (Relação Força - Deslocamento) .....	40
Figura 4.4 - Relação das forças registradas entre as duas células de carga durante a fase de transferência de pré-esforço nos ensaios de 125 kN.....	41
Figura 4.5 - Relação das forças registradas entre as duas células de carga durante a fase de transferência de pré-esforço nos ensaios de 150 kN.....	42
Figura 4.6 - Gráficos de Arrancamento de 125 kN (Força vs Deslocamento).....	44
Figura 4.7 - Gráficos de Arrancamento de 150 kN (Força vs Deslocamento).....	45
Figura 4.8 - Linhas de tendência da fase de Arrancamento dos ensaios de 125 kN .....	46
Figura 4.9 - Linhas de tendência da fase de Arrancamento dos ensaios de 150 kN .....	47
Figura 4.10 – Linhas de tendência médias dos ensaios de arrancamento de NRM125 e NRM150 .....	48
Figura 4.11 - Relação entre os deslocamentos superiores e inferiores dos ensaios de 125 kN .....	49
Figura 4.12 - Relação entre os deslocamentos superiores e inferiores dos ensaios de 150 kN .....	50
Figura 4.13 - História de carga dos ensaios cíclicos.....	51
Figura 4.14 - Relações Força - Deslocamento do ensaio NRC125-1.....	52
Figura 4.15 - Relações Força - Deslocamento do ensaio NRC125-2.....	53
Figura 4.16 - Relações Força - Deslocamento do ensaio NRC125-3.....	54
Figura 4.17 - Linhas de tendência dos ensaios cíclicos .....	55
Figura 4.18 - Comparação dos ensaios monotônicos com os ensaios de Vilhena [4] .....	58
Figura 4.19 - Furação dos carotes .....	59
Figura 4.20 - Fendas no betão observadas após extração dos carotes.....	60
Figura 4.21 - Varão de aço furado .....	60

# Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Tabela resumo da caracterização do betão obtido a partir dos ensaios à compressão em cubos ( $f_{c\ cm}$ ) e cilindros ( $f_{c\ cm}$ ) .....	26
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas e geométricas do aço de pré-esforço .....	27
Tabela 4.1 – Valores dos ensaios transferência de pré-esforço e arrancamento .....	56



# Simbologia

## Maiúsculas Latinas

- $E$  - Módulo de elasticidade
- $E_p$  - Módulo de elasticidade do aço de pré-esforço
- $L_{bpd}$  - Comprimento de amarração
- $L_{disp}$  - Comprimento de regularização
- $L_{pt}$  - Comprimento de transmissão
- $U_t$  - Tensão de transferência por aderência

## Minúsculas Latinas

- $d$  - Altura útil da armadura tracionada
- $f_{bpt}$  - Tensão de aderência
- $f_{ct}$  - Valor de cálculo da resistência do betão à tração
- $f_{ctm}$  - Valor médio da resistência do betão à tração
- $F_{p0,1 k}$  - Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% no aço
- $f_{pk}$  - Valor característico da tensão de rotura à tração no aço
- $f_{pd}$  - Valor de cálculo da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% do aço
- $h$  - Altura total do elemento de betão

## Alfabeto Grego

- $\epsilon_{uk}$  - Extensão da armadura de pré-esforço para a carga máxima
- $\Delta L$  - Deslocamento
- $\sigma_{ps}$  - Tensão da armadura de pré-esforço
- $\sigma_{se}$  - Tensão de pré-esforço efetiva após as perdas
- $\sigma_{pi}$  - Tensão no cordão imediatamente após a libertação
- $\gamma_c$  - Coeficiente parcial de segurança do betão
- $\Phi$  - Diâmetro nominal da armadura

**Abreviaturas utilizadas**

ACI - American Concrete Institute

CC - Célula de carga

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia

PCI - Precast Concrete Institute

UNL - Universidade NOVA de Lisboa



# 1.Introdução

## 1.1 Considerações gerais

Ao longo do tempo, o Homem tem aprimorado as suas técnicas construtivas, desde as mais simples às mais complexas, mas, para saber o que melhorar, foi preciso falhar. O reforço estrutural surgiu de modo a melhorar quaisquer falhas que possam existir na estrutura a reforçar, por exemplo, resistência insuficiente, alteração da utilização da estrutura, alteração da regulamentação. Estas que podem ser causas de erros de projeto ou de uma má execução da obra.

No reforço de estruturas de betão armado existem várias técnicas, recaindo sobre o projetista, com base nas condições da estrutura e em todas as condicionantes existentes, optar pela que melhor se adequa a cada caso.

O pré-esforço por pós-tensão pode ser utilizado como técnica de reforço sendo principalmente aplicado em obras de grande dimensão, pois tradicionalmente fica exterior ao elemento a reforçar e, por motivos estéticos, práticos e económicos, não costuma ser utilizada em edifícios comuns. O pré-esforço por pós-tensão consiste na introdução de esforços contrariando os esforços provocados pelas cargas aplicadas na estrutura.

O modo de aplicação deste reforço dependerá do objetivo que tem a cumprir, que pode ser a redução de deformações, esforços, vibrações e fendilhação [1].

O presente trabalho destina-se à compreensão do efeito que a força de pré-esforço inicial tem na ancoragem por aderência quando esta é estabelecida através de agentes aderentes à base de resinas epoxídicas. De modo a estudar este fenómeno realizaram-se ensaios de transferência de pré-esforço (*push-in*) seguidos de ensaios de arrancamento (*pull-out*).

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho destina-se a complementar um trabalho de doutoramento em curso [2] que utiliza a patente PT 103785 A [3] desenvolvida na FCT UNL, dando também continuidade ao trabalho de Vilhena [4] com o estudo do efeito da força de pré-esforço em ancoragens aderentes. O sistema de ancoragem abordado pode ser utilizado no reforço de estruturas de betão armado existentes, e neste caso está a ser aplicado ao reforço de uma viga sujeita a ações sísmicas.

## **1.3 Organização da tese**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo integra a introdução ao tema abordado.

O segundo capítulo aborda o estado do conhecimento do tema, incluindo e detalhando os principais parâmetros influentes.

O terceiro capítulo descreve o procedimento experimental, isto é, todos os passos tomados visando a montagem do sistema de ensaio, os materiais utilizados e a explicação detalhada dos ensaios.

O quarto capítulo aborda a análise dos resultados obtidos, onde estes são apresentados e comparados entre si de modo a compreender melhor o comportamento do sistema proposto. É também apresentado um ensaio de remoção de carotes de forma a ser possível observar a ligação entre os vários materiais. Este ensaio foi feito com o objetivo de complementar as conclusões retiradas dos ensaios experimentais.

Por fim, no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho e é apresentada a forma de como este estudo contribuiu para o avanço do sistema proposto. São também apresentadas sugestões para desenvolvimentos futuros.

## 2. Estado da arte

### 2.1 Considerações Gerais

Existem vários tipos de ancoragens, sendo o seu principal objetivo garantir a ligação entre dois ou mais elementos. O presente trabalho dedicou-se ao estudo da ligação entre um cordão de pré-esforço e um elemento de betão, sendo esta ligação garantida pela utilização de uma resina epoxídica.

As ancoragens adesivas, como o nome indica, transferem esforços por adesão ao longo de todo o comprimento de aderência. Esta transferência de esforços depende da ligação entre o aço e o adesivo, e da ligação entre o betão e o adesivo.

Este tipo de ancoragem consiste na colocação de um elemento de aço no interior de um furo no betão de diâmetro superior ao do elemento de aço. A ancoragem propriamente dita é assegurada pelo agente aderente injetado entre as interfaces do aço e betão.

A Figura 2.1 ilustra um exemplo deste tipo de sistema de ancoragem.

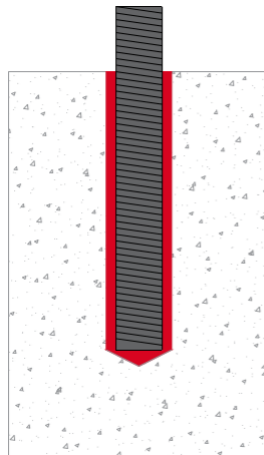


Figura 2.1 - Exemplo de ancoragem por aderência

O estado da superfície do cordão é um fator que afeta significativamente a aderência. A ligação entre o betão e o adesivo é bastante influenciada pela preparação do furo onde se injeta. Caso haja algum tipo de pó nas paredes do furo, a ligação pode ser altamente condicionada. [5]

## 2.2 Pré-esforço

O pré-esforço consiste na aplicação de estados de tensão à estrutura de modo a reduzir ou eliminar os efeitos das cargas ou deformações existentes.

O pré-esforço pode ser aplicado utilizando duas técnicas distintas, por pré-tensão ou por pós-tensão. A primeira é principalmente utilizada em elementos pré-fabricados, consistindo no tensionamento das armaduras de pré-esforço antes da betonagem, o que permite um maior controle da operação. A transferência de esforços no pré-esforço por pré-tensão é totalmente assegurada pela aderência entre o aço e o betão. Como os esforços são distribuídos ao longo do comprimento de transmissão, a tensão será distribuída uniformemente ao longo deste comprimento.

O pré-esforço por pós-tensão, por norma, é aplicado em obra e tem a grande vantagem de poder ser usado como um método de reforço, como estudado no presente trabalho. Ao contrário do pré-esforço por pré-tensão, este tipo de pré-esforço não depende da aderência para a transferência de esforços, neste caso a transferência é realizada nas extremidades do elemento através de ancoragens, mas também pode ser transferida ao longo das armaduras [6]. A principal desvantagem do uso de ancoragens é a concentração de tensões muito elevadas, que pode conduzir ao esmagamento localizado do betão.

O estado de tensão instalado em cada tipo de pré-esforço está ilustrado na Figura 2.2.

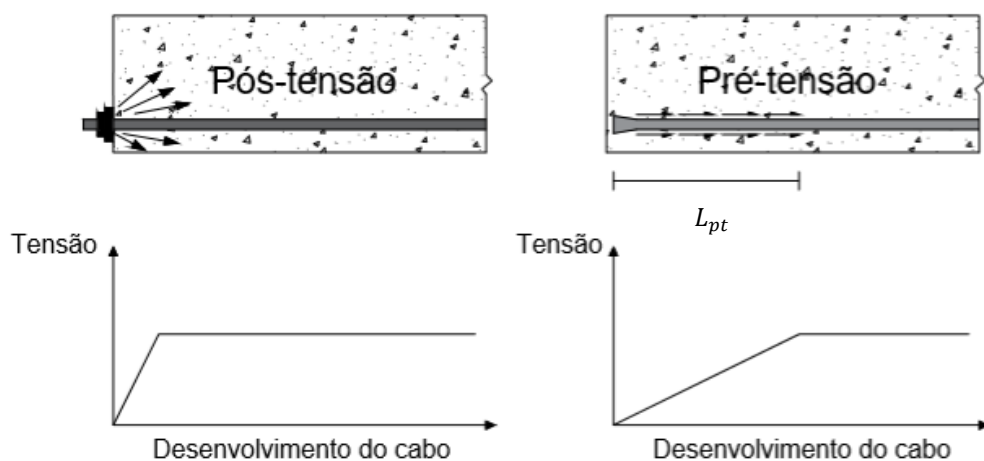


Figura 2.2 - Tensões desenvolvidas por pós-tensão e pré-tensão

## 2.3 Materiais

### 2.3.1 Betão

Devido às elevadas tensões impostas pelo pré-esforço, o betão, para resistir, tem de possuir boas características mecânicas e, para tal, não deve ser de classe inferior a C25/30 [7].

### 2.3.2 Aço de pré-esforço

Os aços destinados a armaduras de pré-esforço devem ser aços de alta resistência, em que as tensões de rotura estão situadas entre os 1700 MPa e os 1900 MPa no caso de cordões, e de cerca de 1000 MPa para as barras. Este aço é caracterizado por ter baixa relaxação [7].

Para fios pode assumir-se um valor do módulo de elasticidade igual a 205 GPa, embora o valor real possa variar entre os 195 e os 210 GPa. Para os cordões este valor é menor, podendo admitir-se um valor de 195 GPa, embora o valor real possa variar entre 185 e 205 GPa [7].

Apesar de um cordão ser composto por vários fios, os módulos de elasticidade não são iguais, pelo facto de, quando o cordão é tensionado, os fios poderem rodar sobre o eixo central do cordão. Este fenómeno acontece porque os fios não estão ligados entre si, permitindo uma deformação acrescida.

Os cordões de pré-esforço devem ser classificados de acordo com a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% ( $f_{p0,1k}$ ), pela relação entre a resistência à tração e a tensão limite convencional de proporcionalidade ( $f_{pk}/f_{p0,1k}$ ), extensão para a carga máxima ( $\epsilon_{uk}$ ), tamanho, características da superfície e a classe, indicando o comportamento de relaxação [8]. Na Figura 2.2 apresenta-se a relação constitutiva deste tipo de aço.

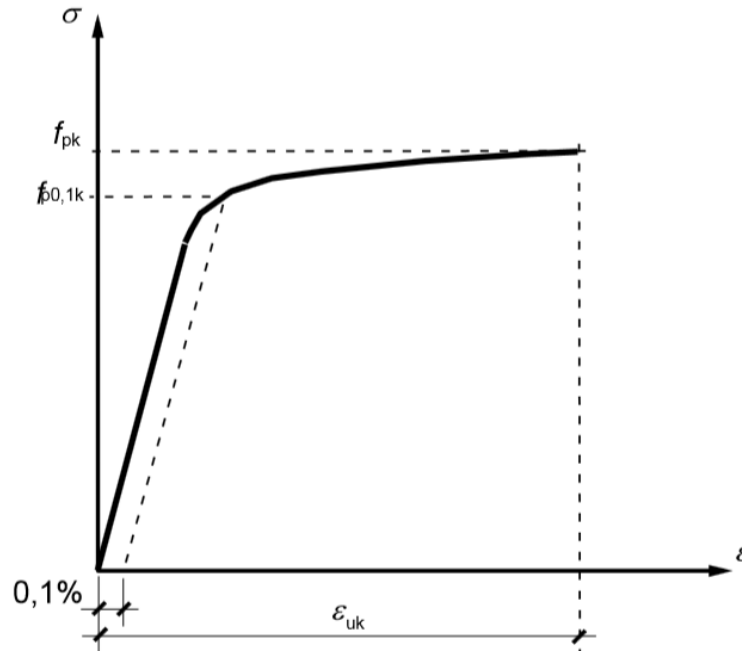


Figura 2.2 - Diagrama tensão-extensão para o aço de pré-esforço comum [8]

A Figura 2.3 representa o comportamento idealizado do aço quando solicitado (A) e o comportamento de cálculo (B) que já tem em conta o coeficiente de segurança, minorando o valor máximo da resistência à tração.

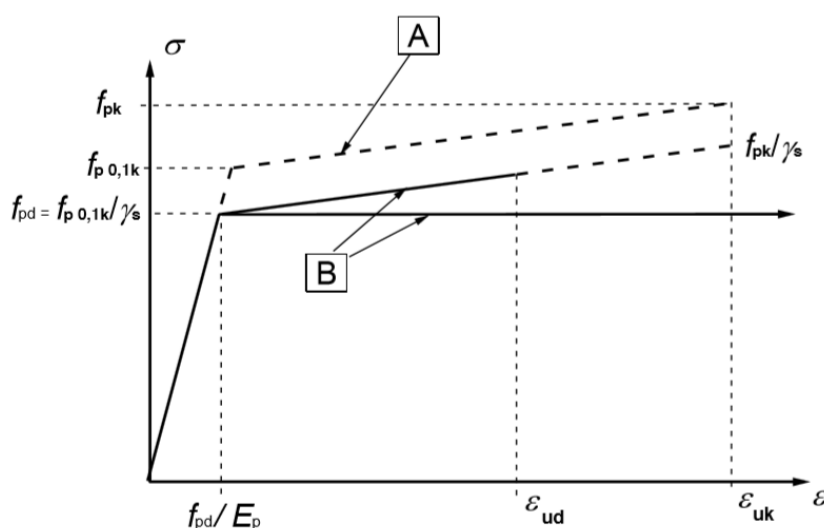


Figura 2.3 - Diagrama idealizado e de cálculo de tensão-extensão para o aço de pré-esforço [8]

### 2.3.3 Resinas Epoxídicas

Os adesivos epóxi são compostos químicos sintéticos constituídos por resina epóxi e um elemento endurecedor. De modo a ocorrer a cura do adesivo é necessária a junção entre estes dois elementos que se dá aquando da aplicação dos mesmos. Durante este processo é libertado calor, calor este gerado a partir de uma reação exotérmica. As resinas epóxi têm como principais vantagens a durabilidade, longo prazo de vida útil, boa resistência à fendilhação e boa resistência à retração durante a cura [5].

## 2.4 Ancoragens de pré-esforço por pré-tensão

As ancoragens de pré-esforço por pré-tensão, à semelhança do presente trabalho, funcionam por aderência, sendo no pré-esforço por pré-tensão o betão o agente aderente. Sendo ambos os métodos baseados na aderência entre diferentes materiais, pode estabelecer-se uma relação entre o presente método e o pré-esforço por pré-tensão.

Ao longo dos anos tem-se vindo a estudar o modo de transmissão da força de pré-esforço para o elemento de betão. O comprimento aderente divide-se em comprimento de transmissão, regularização e amarração.

O gráfico da Figura 2.4 representa os três comprimentos de referência presentes num elemento de betão pré-esforçado por pré-tensão em que  $\sigma_{se}$  representa a tensão efetiva no cordão e  $\sigma_{ps}$  representa a tensão no cordão quando o elemento atinge a força última.

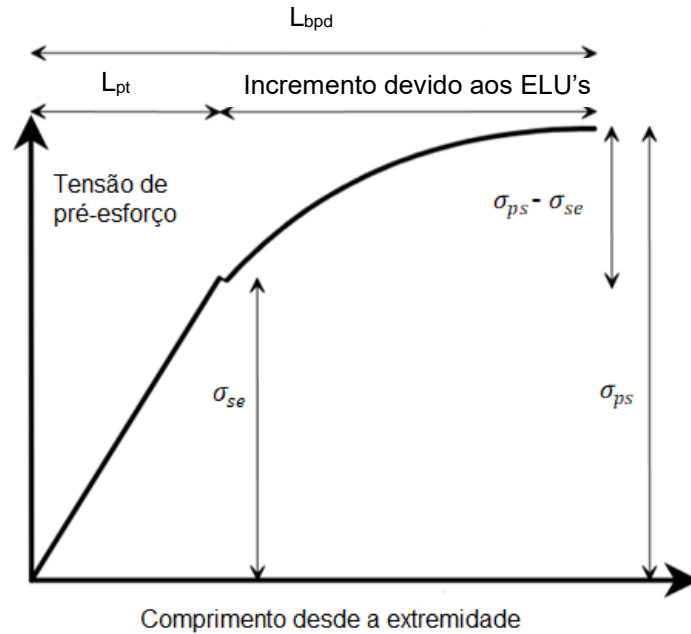


Figura 2.4 - Variação da tensão do cordão ao longo do seu comprimento (adaptado de [9])

#### 2.4.1 Comprimento de transmissão

O comprimento de transmissão ( $L_{pt}$ ) é o comprimento de ligação necessário para transmitir toda a força de pré-esforço.

Ao libertar o pré-esforço, as extremidades do cordão tendem a escorregar para o interior do elemento de betão, pelo que existirão deslocamentos relativos ao longo do comprimento de transmissão. Oh et al. [10], com base nos resultados obtidos, concluiu que seria razoável assumir que a tensão instalada no cordão se distribui linearmente de zero (nas extremidades) até ao valor máximo, estando este localizado no final do comprimento de transmissão onde já se desenvolveu toda a tensão no cordão.

A Figura 2.5 mostra quatro tipos de distribuição de tensão de aderência descritos em [11], estas distribuições foram estudadas por vários investigadores.

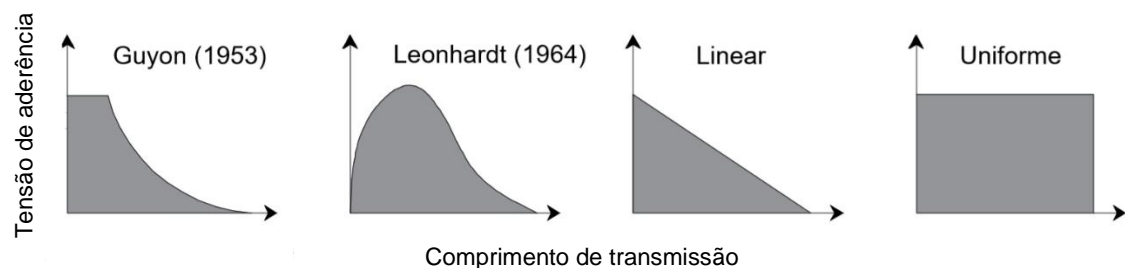


Figura 2.5 - Distribuições da tensão de aderência ao longo do comprimento de transmissão (adaptado de [12])

O gráfico da Figura 2.6 representa outro modelo para a distribuição da tensão de aderência da ligação e para a distribuição da tensão no cordão, onde  $\sigma_{se}$  representa a tensão de pré-esforço efetiva após as perdas e  $U_t$  representa a tensão de transferência por aderência.

É de notar que a tensão ao longo do comprimento de transmissão representada no gráfico da Figura 2.4 é semelhante ao do gráfico da Figura 2.6, embora o último esteja ampliado em relação ao primeiro.

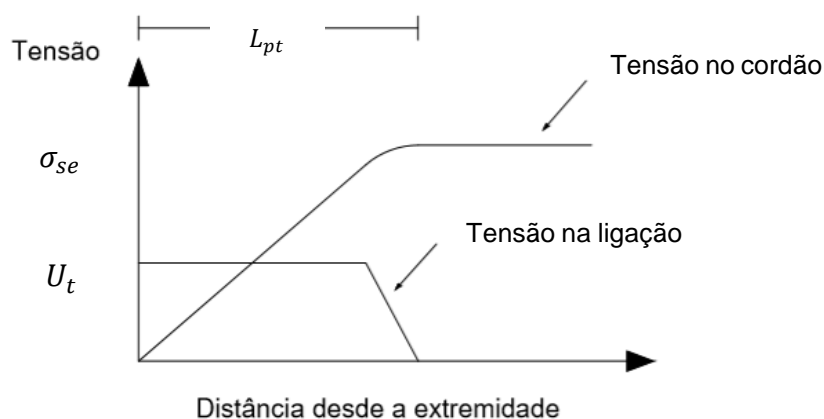


Figura 2.6 - Distribuição de tensões ao longo do comprimento de transmissão (adaptado de [13])

#### 2.4.2 Comprimento de regularização

O comprimento de regularização, ( $L_{disp}$ ), é o comprimento necessário para assegurar uma difusão das tensões na peça de betão até uma distribuição linear.

#### 2.4.3 Comprimento de amarração

O valor de cálculo do comprimento de amarração, ( $L_{bpd}$ ), é todo o comprimento necessário para se transmitir toda a tensão instalada na armadura de pré-esforço,  $\sigma_{ps}$ , para o betão.

#### 2.4.4 Variáveis influentes

As variáveis que têm efeito nos comprimentos de transmissão de tensões têm sido alvo de uma compreensão aprofundada.

Em vários estudos, como [10] e [14], concluiu-se que existem vários parâmetros que afetam o comprimento de transmissão e de amarração, entre eles estão:

- Tipo de aço do cordão
- Diâmetro do cordão
- Força de pré-esforço aplicada



- Condição da superfície do cordão
- Resistência do betão
- Velocidade da transferência de pré-esforço
- Perdas de pré-esforço
- Recobrimento e espaçamento das armaduras
- Consolidação e homogeneidade do betão à volta do cordão
- Fendas existentes no betão

#### Diâmetro do cordão

A influência do diâmetro do cordão tem sido muito estudada por vários autores. A grande maioria chegou à conclusão que, quanto maior o diâmetro, maior o comprimento de transmissão e de amarração ([10], [15], [16], [13]). Nos ensaios de [17] observou-se um aumento de comprimento de transmissão de cerca de 30% dos cordões de 12.7mm de diâmetro para os de 15.2mm de diâmetro.

#### Resistência do betão

Em [10], [16] e [17] concluiu-se que a capacidade resistente do betão afeta o comprimento de transmissão. Observou-se que, com o aumento da resistência à compressão do betão, ocorria uma diminuição tanto do comprimento de transmissão como do de amarração.

Os resultados obtidos em [15] permitiram afirmar que um betão de alta resistência tem um grande impacto no comprimento de transmissão, provocando um decréscimo relevante. Por outro lado, [15] e [18] concluíram que a resistência do betão tinha muito pouca influência no comprimento de transmissão.

#### Estado da superfície do cordão

O efeito do estado da superfície do cordão é dos mais importantes para a ligação entre o aço e o betão. Estudos mostram que, quanto mais rugosa a superfície do cordão, melhor desempenho terá. A sua superfície pode ser muito ferrugenta, pouco ferrugenta, coberta com epóxi, oleada ou indentada. Segundo [17], [19], [20] e [21], os cordões com uma superfície mais rugosa, entenda-se a muito rugosa e a coberta com epóxi, mostraram ser mais eficientes do que os menos rugosos, apresentando uma diminuição nos comprimentos de transmissão e amarração. Concluiu-se que uma superfície oxidada reduz significativamente o comprimento de transmissão.

### Força de pré-esforço

A força aplicada no cordão afeta o comprimento de transmissão na medida em que, quanto maior for a força de pré-esforço, maior será o comprimento de transmissão e menor será o de amarração. Este parâmetro também influenciará o comprimento de regularização da ligação uma vez que a tensão adicional na secção crítica será mais baixa [9]. Em [17] concluiu-se que o aumento do comprimento de transmissão é aproximadamente proporcional à raiz quadrada do aumento da força de pré-esforço.

### Velocidade de descarga do pré-esforço

A libertação do pré-esforço pode ser feita de forma lenta, rápida ou instantânea.

Em [15] observou-se um aumento de comprimento de transmissão para uma descarga repentina.

### Recobrimento

Observou-se que o aumento do recobrimento também resulta na diminuição do comprimento de transmissão [17].

#### 2.4.5 Fendas e tensões causadas pelo pré-esforço

As fendas existentes no betão são fenómenos irreversíveis. Estas podem formar-se devido a vários fatores, entre estes, a transferência da força de pré-esforço ao elemento de betão armado. As fendas causadas pelo pré-esforço por pré-tensão formam-se onde existem maiores concentrações de tensões.

A Figura 2.7 mostra as tensões e as fendas causadas por estas que se podem desenvolver num elemento pré-tensionado.

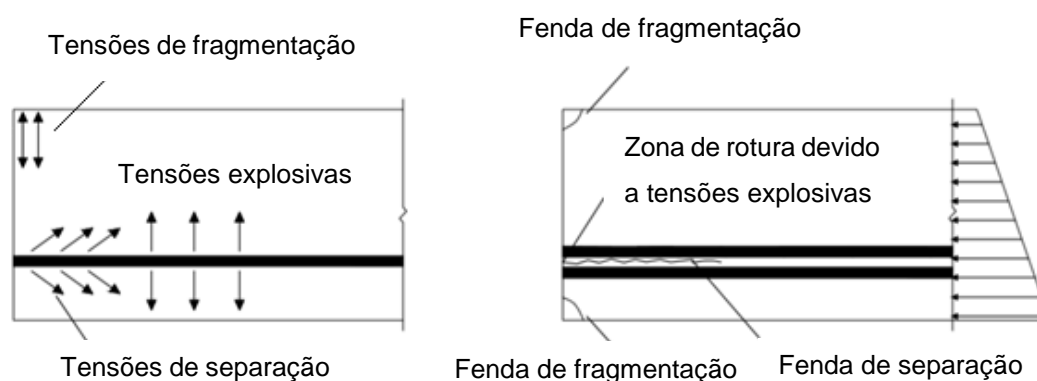


Figura 2.7 - Tensões transferidas e respectivas fendas (adaptado de [22])

- Fendas por separação – Estas fendas resultam de forças de tração presentes no aço de pré-esforço que são transferidas ao betão por aderência;

- Fendas por explosão – Ocorrem muito próximo da armadura de pré-esforço e podem levar ao desenvolvimento de fendas radiais.
- Fendas por fragmentação – Desenvolvem-se muito perto das extremidades das peças.

No caso da pré-tensão, são características as tensões de separação, que se formam ao longo do comprimento da ancoragem, provocando a dessolidarização dos materiais, podendo causar um mecanismo de rotura local.

#### 2.4.6 Mecanismos resistentes das ancoragens

Como já foi referido, a transferência de esforços do aço para o betão é feita através da ligação entre estes dois materiais.

Evans e Robinson [23] estudaram os fatores que poderiam ser responsáveis por esta transmissão e chegaram à conclusão que os principais seriam a adesão, a ação mecânica, o atrito e a dilatação da extremidade do cordão.

- Adesão – fenómeno presente na ancoragem que resiste ao escorregamento inicial, ou seja, quando este é de valores muito pequenos.

A adesão deve-se a micro-interligações mecânicas, ou seja, apesar da superfície dos fios de aço aparentar ser completamente lisa, existe uma rugosidade microscópica que, quando libertada a força de pré-esforço, entra em contacto com o betão provocando uma força de corte que resiste ao escorregamento.

- Atrito – resistência provocada durante o escorregamento pelo atrito formado na interface entre os dois materiais. Esta resistência é influenciada pelas condições da superfície do aço de pré-esforço.

Este fenómeno só ocorre devido à existência de tensões radiais de compressão na interface aço-betão e estas tensões surgem devido à dilatação da extremidade do cordão.

- Ação mecânica – semelhante à adesão, ocorrem interligações mecânicas, mas, neste caso, a nível macroscópico. Devido à forma helicoidal do cordão, formam-se cunhas de betão entre os fios adjacentes. Isto impede os fios exteriores de rodarem em torno do fio central, restringindo o escorregamento.
- Dilatação da extremidade do cordão – aquando da libertação da força de pré-esforço, a extremidade do cordão perde toda a força previamente instalada levando à expansão radial do cordão, também conhecida como o efeito de Hoyer, representado na Figura 2.8.

Esta expansão funcionará como uma cunha que resistirá ao escorregamento.

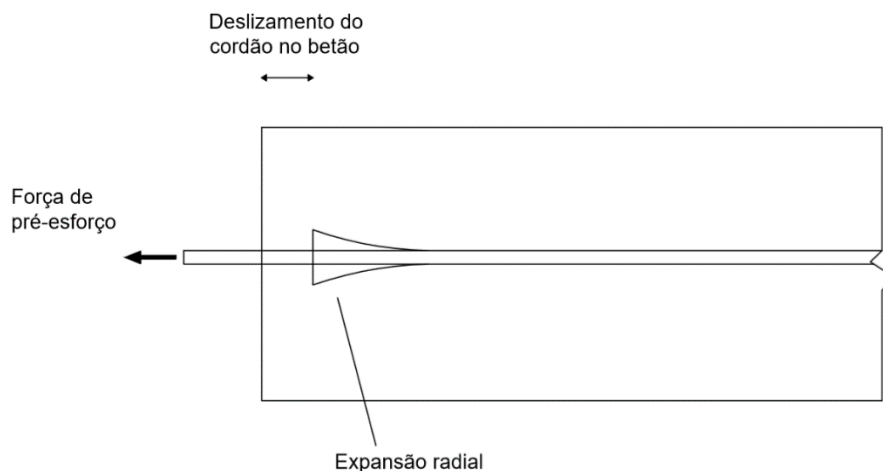


Figura 2.8 - Efeito de Hoyer

#### 2.4.7 Efeito de Hoyer

Como referido anteriormente, o efeito de Hoyer tem um papel importante na transferência da força pré-esforço. Quando um cordão é tensionado, o seu diâmetro diminui devido ao efeito de Poisson. Em elementos pré-tensionados, depois da cura do betão, é libertado o pré-esforço e, imediatamente após a libertação, o cordão tenta retomar o seu diâmetro original dando origem a tensões radiais na interface aço-betão [24].

Como abordado antes, as tensões no cordão junto à extremidade do elemento de betão vão diminuindo até serem nulas, isto provocará um aumento do diâmetro junto à extremidade e uma reentrada do cordão como se pode ver na Figura 2.8.

Na Figura 2.9 pode observar-se a influência do efeito de Hoyer ao longo do comprimento de transmissão. À medida que o diâmetro do cordão se aproxima do tamanho original mais fendas se originam devido a maiores tensões radiais e tangencias geradas por este aumento de diâmetro.

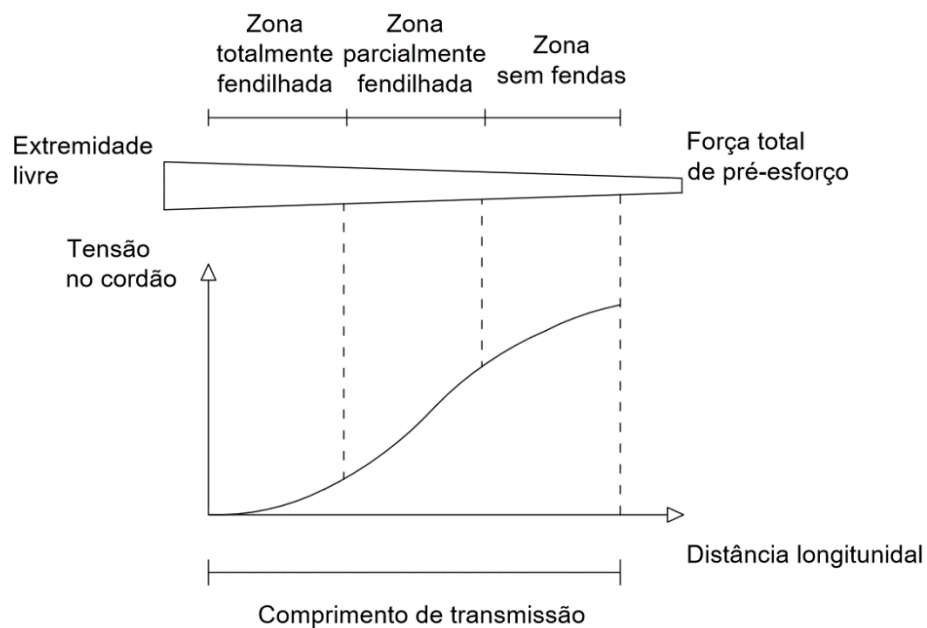


Figura 2.9 - Desenvolvimento de tensões e fendas na zona de transferência devido ao efeito de Hoyer (adaptado de [25])

## 2.5 Recomendações de cálculo dos comprimentos de referência segundo o Eurocódigo 2 [8]

Como referido anteriormente, durante o processo de transferência de pré-esforço para o betão, existem três comprimentos de referência. Esta norma mostra como determinar cada um deles.

A Figura 2.10 apresenta a distribuição de tensões ao longo dos comprimentos de referência segundo o EC-2 [8].

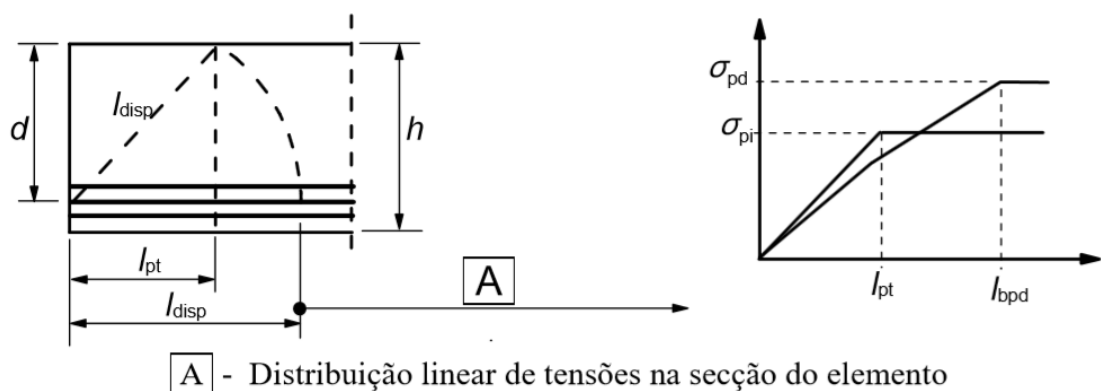


Figura 2.10 - Transferência de pré-esforço e definição dos comprimentos de referência segundo o EC-2 [8]

### 2.5.1 Comprimento de transmissão, $l_{pt}$

Como já referido, estudos provaram a influência de vários parâmetros na determinação do comprimento de transmissão. A equação (2.1) mostra concordar com alguns dos parâmetros influentes enunciados em 2.4.4.

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \Phi \sigma_{pi} / f_{bpt} \quad (2.1)$$

onde:

$\alpha_1 = 1,0$  para uma libertação gradual e  $1,25$  para uma libertação súbita

$\alpha_2 = 0,25$  para armaduras de secção circular e  $0,19$  para cordões de 3 e 7 fios

$\Phi$  = diâmetro nominal da armadura

$\sigma_{pi}$  = tensão no cordão imediatamente após a libertação

$f_{bpt}$  = tensão de aderência =  $\eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t)$

$\eta_{p1} = 2,7$  para fios indentados e  $3,2$  para cordões de 3 a 7 fios

$\eta_1 = 1,0$  ou  $0,7$  para boas condições de aderência ou para outros casos respetivamente

$f_{ctd}(t)$  = valor de cálculo da resistência do betão à tração no momento da libertação, calculado pela equação (2.2)

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} 0,7 f_{ctm} / \gamma_c \quad (2.2)$$

$\alpha_{ct}$  = coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo da resistência à tração bem como o método de libertação do pré-esforço

$f_{ctm}$  = valor médio da resistência do betão à tração

$\gamma_c$  = coeficiente parcial de segurança do betão, tomando o valor de  $1,5$ .

O valor de cálculo do comprimento de transmissão deverá corresponder ao valor menos favorável dos obtidos pelas equações (2.3) e (2.4):

$$l_{pt1} = 0,8 l_{pt} \quad (2.3)$$

ou

$$l_{pt2} = 1,2 l_{pt} \quad (2.4)$$

O valor mais baixo é utilizado na verificação de tensões locais no momento da libertação e o valor mais alto para os estados limites últimos.

### 2.5.2 Comprimento de regularização, $l_{disp}$

Como referido anteriormente, a partir deste comprimento as tensões no betão ficam distribuídas linearmente. Para o cálculo do mesmo pode ser utilizada a equação (2.5):

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2} \quad (2.5)$$

em que  $d$  é a altura útil da peça. Esta equação é facilmente deduzida a partir da Figura 2.10.

### 2.5.3 Comprimento de amarração, $l_{bpd}$

O comprimento de amarração necessário para uma armadura com tensão instalada de  $\sigma_{pd}$  pode ser calculado pela equação (2.6):

$$l_{bpd} = l_{pt2} + \alpha_2 \Phi (\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}) / f_{bpd} \quad (2.6)$$

Nesta equação está presente a contribuição do comprimento de transmissão para os estados limites últimos,  $l_{pt2}$ , os coeficientes  $\alpha_2$  e  $\Phi$ , definidos na equação (2.1), e a relação entre o incremento de tensões no aço devido às ações externas,  $\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}$ , e a tensão de rotura da aderência da amarração no estado limite último,  $f_{bpd}$ .

Para a determinação de  $f_{bpd}$  pode ser utilizada a equação (2.7)

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \eta_1 f_{ctd} \quad (2.7)$$

onde o coeficiente  $\eta_{p2}$  toma o valor 1,4 para fios indentados e 1,2 para cordões de 7 fios.

A Figura 2.11 representa a distribuição de tensões ao longo dos comprimentos de transmissão e de amarração no momento da libertação do pré-esforço para estados limites últimos.

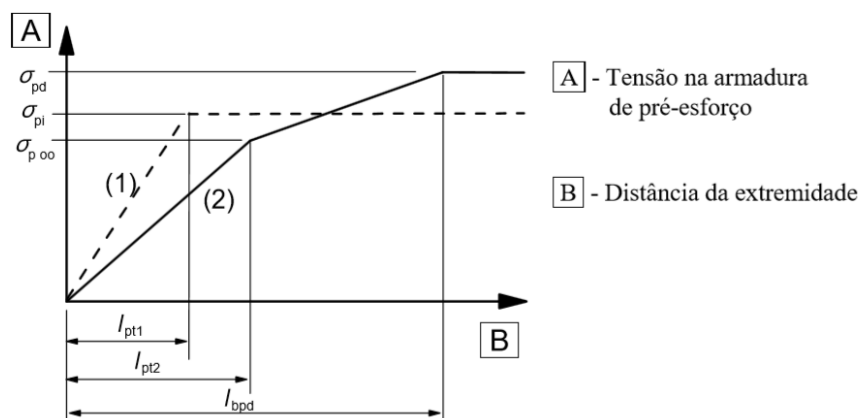


Figura 2.11 – Distribuição de tensões na zona de amarração: (1) no momento da libertação do pré-esforço e (2) para estados limites últimos [5]

## 2.6 Ancoragens por aderência

A utilização de ancoragens por aderência é muito comum em técnicas de reforço. Estas ancoragens podem ser constituídas por matérias químicas como poliéster, viniléster e epóxi, mas também podem ser constituídas por matérias cimentíceas como grout ou calda de cimento.

### 2.6.1 Fatores influentes na força de ligação

Conforme referido anteriormente, a transferência de esforços para o betão é assegurada pelas ligações entre os vários materiais envolventes, pelas condições da superfície do furo e pelo comprimento de aderência.

Os fatores que influenciam a força de ligação podem ser divididos em dois grupos, internos e externos. Os fatores internos são aqueles em que o utilizador não tem controlo, por exemplo, constituição química do adesivo ou tipo de embalagem, ou seja, características que vêm de fábrica.

O fatores externos, ao contrário dos internos, estão totalmente dependentes do utilizador [26].

Uma boa aderência entre o adesivo e o betão depende de uma boa instalação, da qualidade dos materiais e de múltiplas condições de serviço [27]:

- Temperatura
- Constituição do betão
- Humidade
- Tipo de produto



- Fendilhação
- Tempo de cura

A Figura 2.12 representa o efeito da temperatura em três agentes aderentes diferentes. Como se pode observar, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da força de ligação em todos os produtos, fazendo mesmo um dos produtos perder a totalidade da ligação.

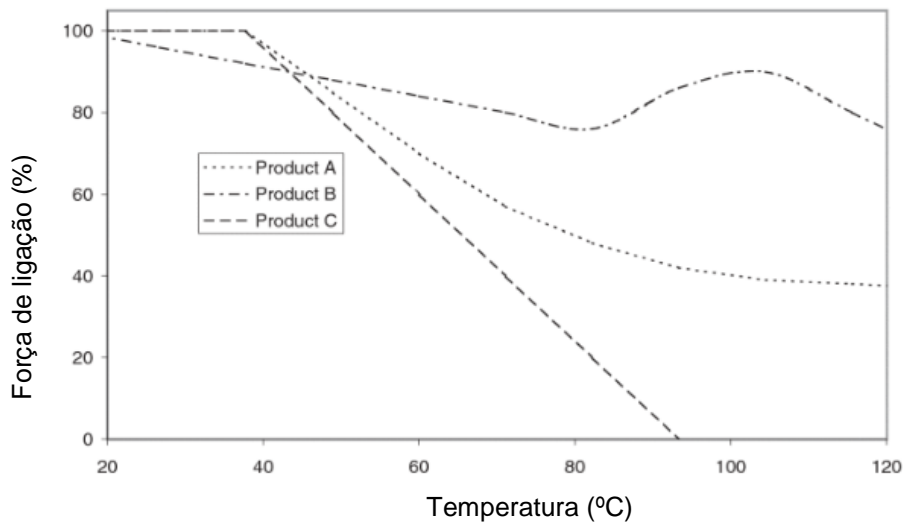


Figura 2.12 - Efeito da temperatura na força de ligação [28]

Poucos estudos foram efetuados sobre a influência dos agregados constituintes do betão, mas Cook e Jain [29] concluíram que quanto mais duros e grosseiros maior a força última da ligação.

A presença de água no furo pode ser condicionante para o desempenho do adesivo. Em contacto com a resina, a água é absorvida lentamente o que leva a um amolecimento do adesivo. Também é possível que a água se infiltre entre a resina e o betão, impedindo qualquer tipo de aderência.

Por fim, a humidade pode infiltrar-se nos poros do betão, levando a um aumento de volume que provocará movimentos infinitesimais, mas suficientes para pôr em causa uma boa aderência [30].

A fendilhação do betão é um fator que pode afetar drasticamente o desempenho de uma ancoragem aderente. Eligehausen e Balogh [31] chegaram à conclusão de que as fendas presentes no betão impedem uma boa aderência entre o betão e a resina podendo reduzir a sua capacidade resistente de 33% a 70% em relação a um betão sem fendas. À semelhança destes investigadores, Meszaros [32] refere que a força de ligação reduz, aproximadamente, para metade da força num betão sem fendas. A Figura 2.13 ilustra a localização das fendas

em ancoragens aderentes e o seu efeito sobre as mesmas, ou seja, o impedimento de aderência entre a resina e o betão.

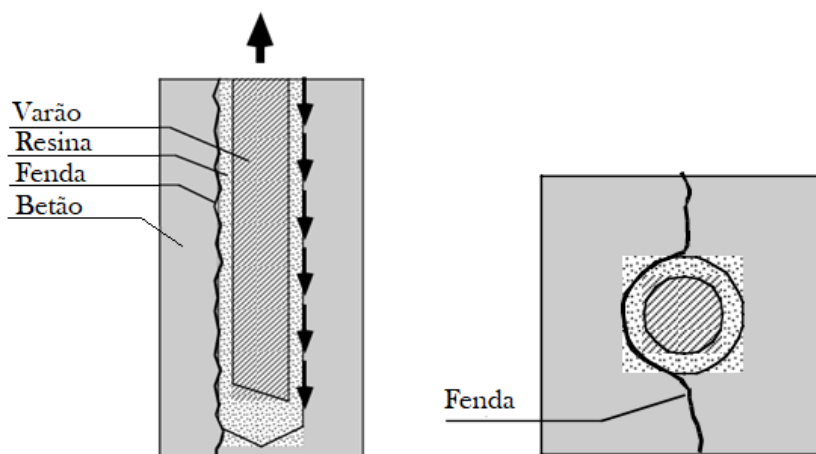


Figura 2.13 - Localização comum de fendas em ancoragens aderentes [34]

Como se pode ver no gráfico apresentado na Figura 2.12, a qualidade do produto tem influência significativa no comportamento da resina.

À semelhança do betão, se a resina não tiver o tempo de cura necessário, ainda terá um grau elevado de viscosidade, logo a sua força de ligação será muito reduzida.

Uma boa instalação da ancoragem pode fazer a diferença entre um bom e um mau desempenho aquando do arrancamento do varão. A devida instalação depende de vários fatores. De acordo com [28] devem considerar-se os seguintes:

- Orientação do furo
- Furação
- Limpeza do furo
- Comprimento de embebimento

A orientação do furo pode ser significativa para o comportamento da ancoragem. Furos com uma orientação ascendente apresentam dificuldades durante o processo de injeção, já que sendo a resina um material fluido, tende a escorrer para fora do furo, ou seja, se a extremidade por onde se injeta não estiver bem selada, podem criar-se bolhas de ar ao longo do furo. Estas bolhas de ar reduzem a área de ligação resina-varão e resina-betão, e, consequentemente, a força de ligação [28].

O processo de furação é importante na medida em que, sendo a força de ligação assegurada principalmente pela ação mecânica, a superfície do furo mais rugosa permitirá maior interligação entre partículas da resina e do betão.

A sujidade no interior do furo fará com que a resina estabeleça a ligação a estes em vez de aderir ao betão, reduzindo drasticamente a força de ligação. Por fim, o comprimento de embebimento pode ser condicionante até a um certo limite, a partir do qual as melhorias serão mínimas.

### 2.6.2 Modos de rotura

Os ensaios de arrancamento consistem na simulação do aumento de carga no elemento estrutural de modo a estudar o comportamento do cordão tensionado.

A Figura 2.14 ilustra os vários modos de rotura quando o varão é submetido a uma força de arrancamento.

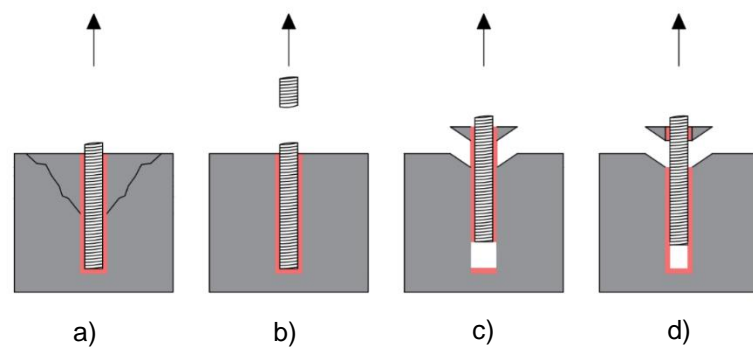


Figura 2.14 - Modos de rotura de ancoragens aderentes: a) pelo betão, b) pelo varão; c) pela interface resina-betão; d) pela interface aço-resina

O esquema da Figura 2.15 representa a relação entre os modos de rotura, a capacidade resistente do betão e o comprimento de embebimento.

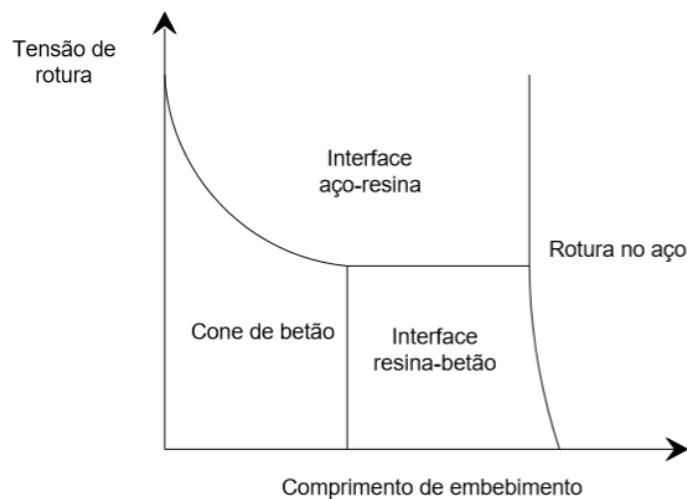


Figura 2.15 - Modos de rotura em função da tensão e do comprimento de embebimento [33]

Pode observar-se que, para um comprimento de embebimento muito pequeno, a formação do cone de betão é o primeiro modo de rotura a ocorrer. Daws [34] sugere que o cone de betão é formado a partir de fendas cónicas que se vão formando cada vez mais longe da superfície de betão.

É possível impedir a formação do cone de betão, segundo [5], se os primeiros 2 a 5 centímetros desde a extremidade visível da ancoragem não forem aderentes, não se formará o bloco de betão e não haverá a redução do comprimento de embebimento.

Alguns estudos concluem que se o comprimento de embebimento for maior, haverá a possibilidade de ocorrer a rotura de três formas, sendo estas a falha da ligação entre o betão e a resina, a falha da ligação entre o aço e a resina e as duas em simultâneo [35]. Esta última é caracterizada pela falha do betão na parte superior da ancoragem e a separação da resina ocorre na parte inferior.

A rotura pelo aço dá-se quando a ligação é muito forte e isto acontece quando o comprimento de embebimento é muito grande.

#### 2.6.3 Ensaios de transferência de pré-esforço

O ensaio de transferência de pré-esforço consiste na libertação de uma das extremidades do cordão após a cura da resina, transferindo a tensão instalada no aço para a resina. Durante este processo de transferência irá ocorrer, devido à configuração helicoidal, torção dos fios e escorregamento. Assim sendo, a tensão do cordão não será totalmente transferida para a resina.

Este ensaio visa estabelecer uma relação entre a tensão a ser transferida para a resina e o deslizamento que o cordão sofre.

#### 2.6.4 Ensaios monotónicos

Segundo [40], a envolvente monotónica pode ser descrita pelos pontos característicos OABCDEF (Figura 2.16).

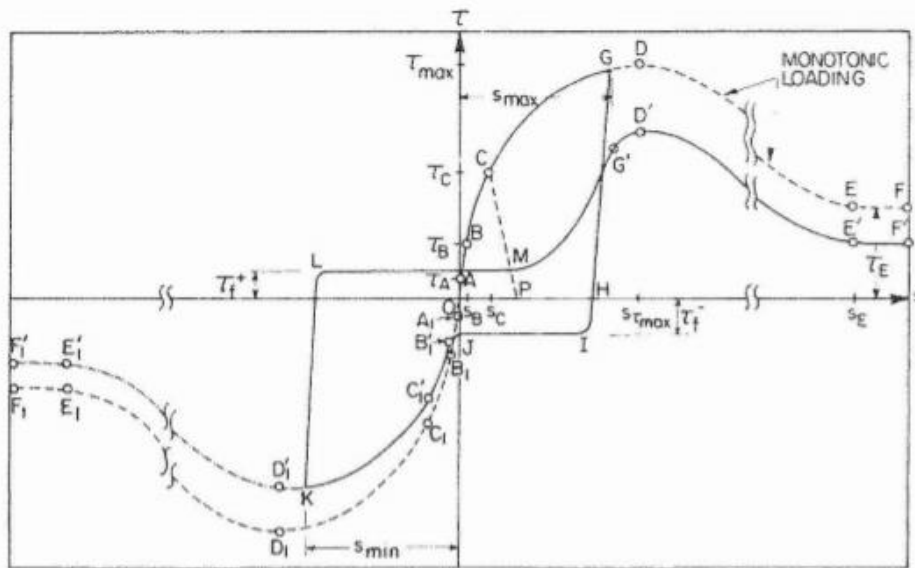


Figura 2.16 – Relação tipo entre a tensão na ligação e o deslocamento para carregamentos cíclicos e monotônicos (adaptado de [40])

Sendo o ponto O o início do carregamento, a adesão assegura a resistência da ligação até ao ponto A, onde ocorre o primeiro deslocamento. Mobilizada a adesão, dá-se início à ação mecânica. Devido às tensões provocadas pela ação mecânica, formam-se fendas internas inclinadas, denominadas de fendas de ligação, até ao ponto B (Figura 2.17). É de salientar que uma das principais causas deste tipo de fendas são as nervuras das barras.

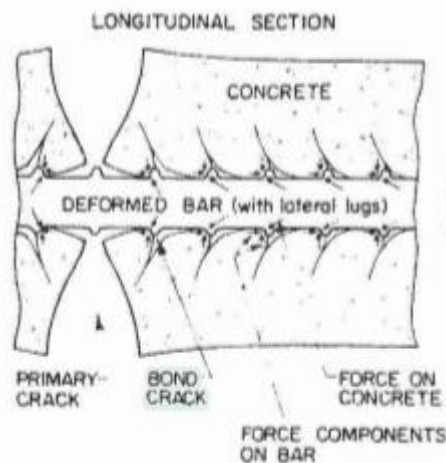


Figura 2.17 – Fendas de ligação internas (adaptado de [41])

Atinge-se o ponto C quando as fendas de separação atingem a superfície de betão. Caso o betão não esteja confinado, a resistência de ligação diminui até ficar nula.

No entanto, com um bom confinamento, é possível continuar a aumentar o carregamento. Quando se começa a aproximar do valor máximo da resistência de ligação, formam-se fendas

por corte (ponto D). Atingindo o ponto E, o betão entre nervuras é praticamente inexistente, sendo o atrito o único mecanismo resistente.

Por fim, é atingido o ponto F onde se dá a rotura total da ligação.

#### 2.6.5 Ensaios cíclicos

De acordo com [39], a força de ligação da ancoragem diminui com o aumento do número de ciclos entre tensões de ligação constantes. O que quer dizer que, mesmo sem aumentar o carregamento de ciclo para ciclo, a força de ligação diminui. A Figura 2.18 apresenta a influência do número de ciclos na relação entre a força de ligação máxima para cargas cíclicas e estáticas.

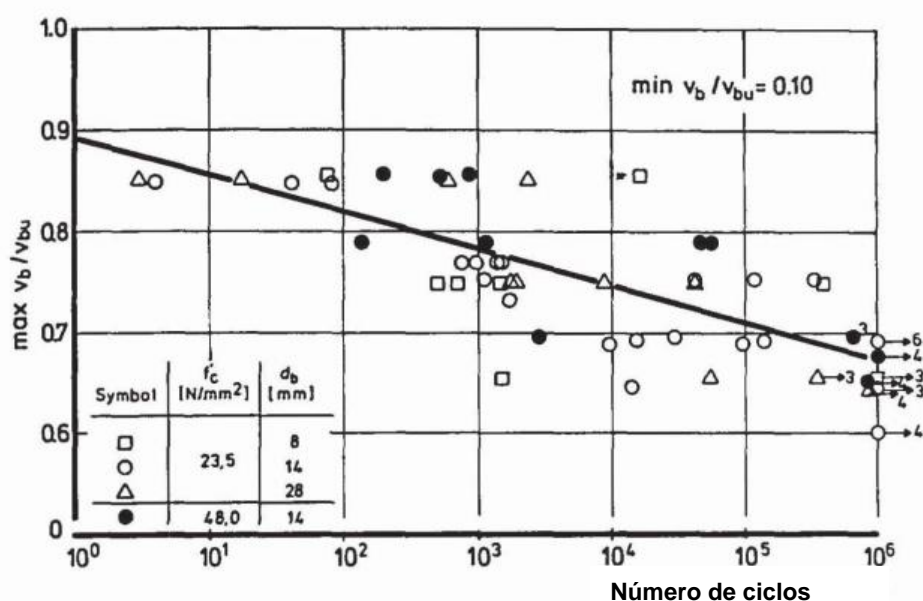


Figura 2.18 – Influência do número de ciclos na relação entre a força de ligação máxima para cargas cíclicas  $v_b$  e estáticas  $v_{bu}$  (adaptado de [39])

Em [39] também se concluiu que o deslizamento correspondente à carga de pico e o deslizamento residual aumenta consideravelmente à medida que o número de ciclos aumenta (Figura 2.19).

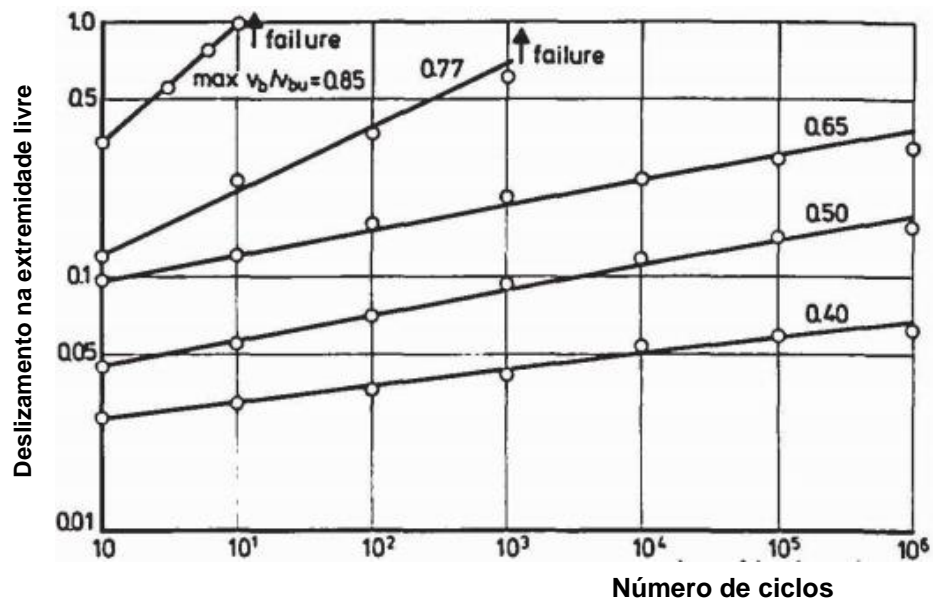


Figura 2.19 – Aumento do deslizamento na extremidade livre sob carga de pico durante a carga cíclica como função do número de repetições de carga (adaptado de [39])

Em [40] constata-se que, caso não ocorra ruptura da ligação por fadiga durante o carregamento cíclico e, se se realizar um ensaio de arrancamento depois do mesmo, obtém-se a envolvente do ensaio monotónico.





## 3. Trabalho experimental

### 3.1 Introdução

De modo a caracterizar o comportamento de aderência, escolheu-se realizar ensaios de arrancamento e transferência de pré-esforço. O presente trabalho consiste na aplicação de pré-esforço, injeção da resina epoxídica e, após a cura da resina, é realizada a transferência de pré-esforço seguido do ensaio de arrancamento (*pull-out*). Neste trabalho realizaram-se nove ensaios, seis monotónicos e três cíclicos, em que em três dos monotónicos aplicou-se uma força de pré-esforço de 125kN e nos outros três aplicou-se uma força de 150kN. A força a aplicar nos ensaios cíclicos ficou dependente dos resultados obtidos nos ensaios anteriores, escolhendo-se aplicar a força de pré-esforço que garantiu um melhor comportamento do sistema. Para todos os ensaios foi utilizado um comprimento de amarração de 500mm, este comprimento foi escolhido com base nos resultados obtidos por Vilhena [4].

### 3.2 Material utilizado

#### 3.2.1 Betão armado

O bloco de betão armado utilizado no ensaio pertenceu anteriormente a outro trabalho realizado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de mestre do aluno Gustavo Moreira. Este trabalho teve como objetivo o estudo da rigidez de flexão de ligações de betão armado pré-fabricado [36].

O betão utilizado é constituído por:

- 3 tipos de agregados
- Cimento Portland CEM I 42,5R fornecido em granel pela SECIL
- Filler fornecido pela PARAPEDRA
- Superplastificante Woerment FM 420
- Relação água cimento,  $A/C = 0,4$

De modo a caracterizar o betão, ensaiaram-se provetes cúbicos e cilíndricos à compressão.

Os ensaios com provetes cúbicos foram realizados com imposição de força a uma velocidade de 11,25 kN/s e, para os provetes cilíndricos, a uma velocidade de 8,80 kN/s. Para estes ensaios obtiveram-se os resultados da Tabela 3.1. É importante considerar que estes provetes foram ensaiados em 2016, o que quer dizer que o betão utilizado para o presente trabalho tinha mais de um ano, logo a sua resistência seria superior.

Tabela 3.1 - Tabela resumo da caracterização do betão obtido a partir dos ensaios à compressão em cubos ( $f_{c\text{ cm}}$ ) e cilindros ( $f_{cm}$ )

Ensaio	1	2	3	4	5	6
Idade (dias)	51	97	94	74	122	128
$f_{c\text{ cm}}$ (MPa)	51,27	58,93	66,76	52,99	59,41	59,09
$f_{cm}$ (MPa)	47,95	57,93	62,95	52,35	60,89	54,72

O aço usado para armadura dos blocos é da classe A500NR. Os blocos foram armados como ilustra a Figura 3.1.

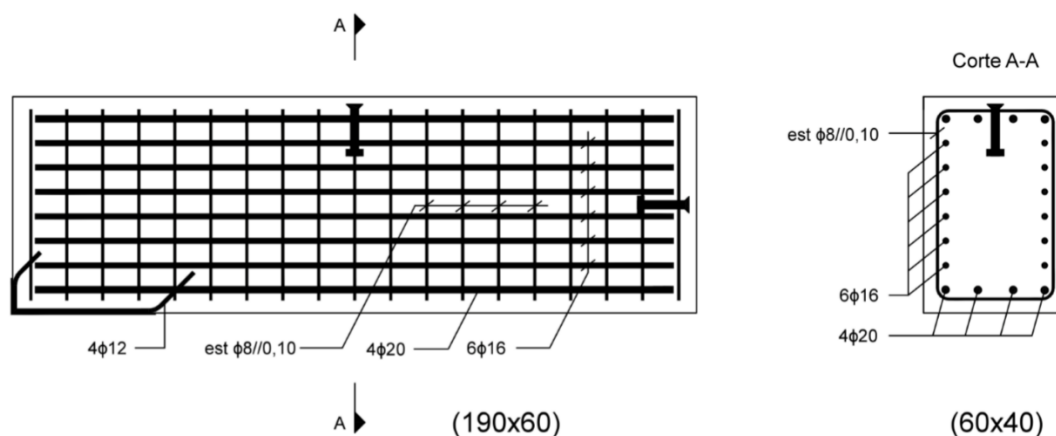


Figura 3.1 - Pormenorização de armaduras do bloco de betão [37]

### 3.2.2 Aço de pré-esforço

O aço de pré-esforço utilizado é constituído por cordões de 7 fios e é um aço Y1860 S7 0.6" S, este aço é apresentado na Figura 3.2. Os valores das propriedades resistentes e geométricas do aço são apresentados na Tabela 3.2.



Figura 3.2 - Aço de pré-esforço utilizado no trabalho

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas e geométricas do aço de pré-esforço

Tipo de cordão	15mm (0,6") Super
Diâmetro nominal (mm)	15,7
Área nominal ( $mm^2$ )	150
Valor característico da tensão de rotura $f_{pk}$ (MPa)	1860
Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% ( $f_{p0,1k}$ )	1600
Valor característico da força de rotura (kN)	279
Módulo de elasticidade $E_p$ (GPa)	195 (valor aproximado)
Relaxação a 1000 horas (%)	2,5 (máximo)

### 3.2.3 Resina epoxídica

Optou-se por utilizar a resina HIT-RE 500 V3, ilustrada na Figura 3.3. Esta decisão derivou dos resultados obtidos por Faria [38], dado que esta resina revelou um desempenho superior relativamente aos outros agentes de aderência ensaiados.



Figura 3.3 - Resina utilizada no trabalho experimental [39]

## 3.3 Preparação do ensaio

### 3.3.1 Furação do betão

Efetuar-se-ão nove furos no bloco de betão previamente apresentado em 3.2.1 com uma caroteadora de diâmetro exterior de 18mm e com 1m de comprimento, usando apenas o modo de rotação com água corrente de modo a que seja uma operação mais limpa. É de referir que o bloco de betão já tinha cinco furos concluídos e quatro a metade do processo antes do início deste trabalho. Depois de acabados, com um berbequim, abriu-se um roço na extremidade inferior de cada furo para, aquando da injeção, haver espaço para inserir o tubo de bisel.

### 3.3.2 Limpeza do cordão

A limpeza do cordão de aço é muito importante, esta destina-se a remover a ferrugem, gorduras e quaisquer impurezas indesejadas. Como referido anteriormente, a ferrugem presente na superfície do cordão é um fator que, devido à sua alta rugosidade, melhora a aderência ao aço. Mas como esta não é uma variável que se possa controlar facilmente de modo a ser igual em todos os cordões, resolveu-se manter as condições dos estudos previamente feitos de forma a ter um grau de comparação fiel aos resultados obtidos por estes com cordões limpos e livres de ferrugem. A limpeza do cordão efetuou-se com uma escova de aço e papel com acetona.

### 3.3.3 Restrição do comprimento de aderência

Sendo que o bloco de betão tem 60cm de altura e, pretendendo-se garantir o comprimento de aderência de 500mm, selou-se o cordão com plasticina e fita adesiva em duas zonas, 8cm

desde a extremidade superior do bloco e 2cm desde a extremidade inferior para impedir que a resina escorresse pelos espaços entre os fios como mostra a Figura 3.4. Estas distâncias estão diretamente relacionadas com os modos de rotura do betão referidos anteriormente. A fase de selagem está ilustrada na Figura 3.5.



Figura 3.4 - Fluxo de resina indesejado



Figura 3.5 - Selagem do cordão com plasticina e fita adesiva

### 3.3.4 Limpeza do furo

A limpeza do furo é uma fase de extrema relevância, pois, como dito anteriormente, a ligação entre o agente adesivo e o betão fica condicionada se a resina estiver em contacto com poeira e não diretamente com a superfície de betão. Para impedir que, após a limpeza, o furo voltasse a ganhar pó, limpou-se cada furo imediatamente antes de se inserir o cordão para a aplicação do pré-esforço.

Os instrumentos utilizados para esta fase foram um escovilhão e uma pistola de ar comprimido como ilustra a Figura 3.6.



Figura 3.6 - Pistola de ar comprimido e escovilhão

Para garantir uma eficiente limpeza do furo, passou-se o escovilhão pelo furo seguido do ar comprimido e repetiu-se este processo até não se ver mais pó a sair por nenhuma extremidade do furo.

### 3.3.5 Sistemas de medição de força e deslocamentos

Antes de se inserir o cordão, foram colocados dois discos alinhados com o furo, um por cima do bloco e outro por baixo. Estes discos servem para encostar as ponteiros dos defletómetros de modo a medir os deslocamentos do cordão em cima e em baixo do bloco como ilustra a Figura 3.7.



Figura 3.7 - Discos utilizados como referência para medição de deslocamentos: a) Face superior, b) Face inferior

Estes discos estão ligados a cilindros para permitir a sua fixação com cunhas nas posições desejadas. No total foram colocados cinco defletômetros do tipo TML CDP-100, dois em cada disco e um no perfil inferior. Os defletômetros são colocados nestas posições para obter os deslocamentos devidos ao alongamento do cordão e ao escorregamento do cordão em relação à resina, pois, durante o ensaio de arrancamento, quando os defletômetros inferiores começarem a ler deslocamentos significa que está a haver escorregamento.

O defletômetro colocado no perfil metálico tem como objetivo medir os deslocamentos do mesmo durante a aplicação do pré-esforço de modo a prevenir a sua plastificação ou deformações excessivas. A figura 3.8 mostra os defletômetros colocados nas respetivas posições.



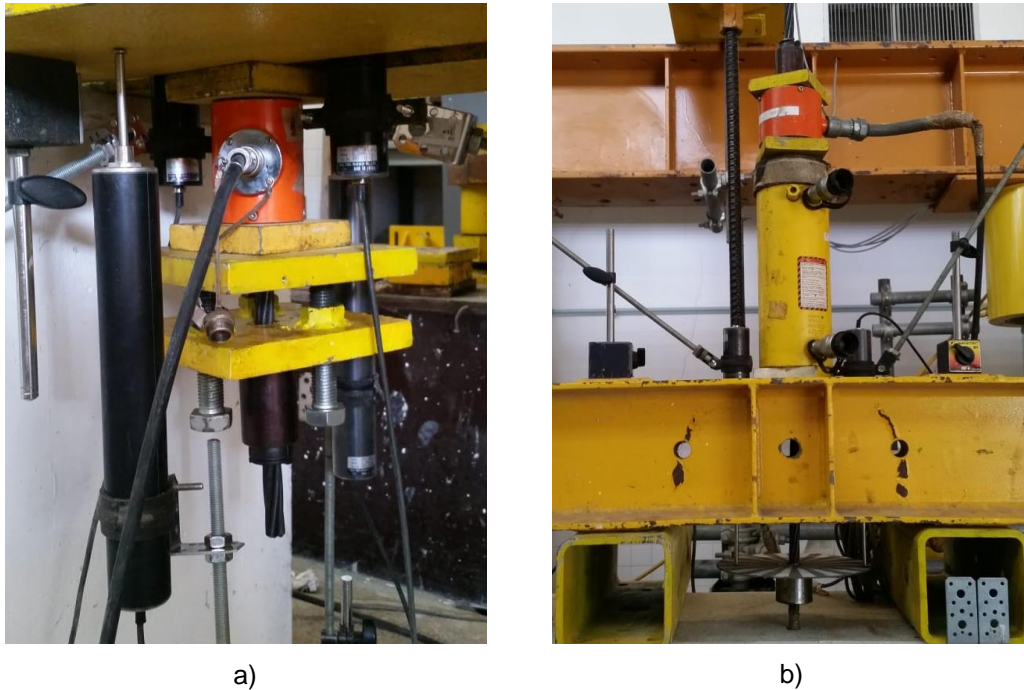


Figura 3.8 - Posição das células de carga e dos defletômetros: a) Inferiores, b) Superiores

Como se pode observar na Figura 3.8, utilizaram-se duas células de carga no sistema de ensaio, nas extremidades superior e inferior do cordão. Durante a aplicação do pré-esforço as células apresentarão aproximadamente o mesmo valor de carga, embora seja possível existir alguma discrepância entre elas. Durante a fase de arrancamento somente a célula de carga superior é que apresentará valores de carga uma vez que se libertou a extremidade inferior do cordão.

Depois de cumpridos todos os passos mencionados, a estruturação do ensaio ficará semelhante à do esquema representado na Figura 3.9.



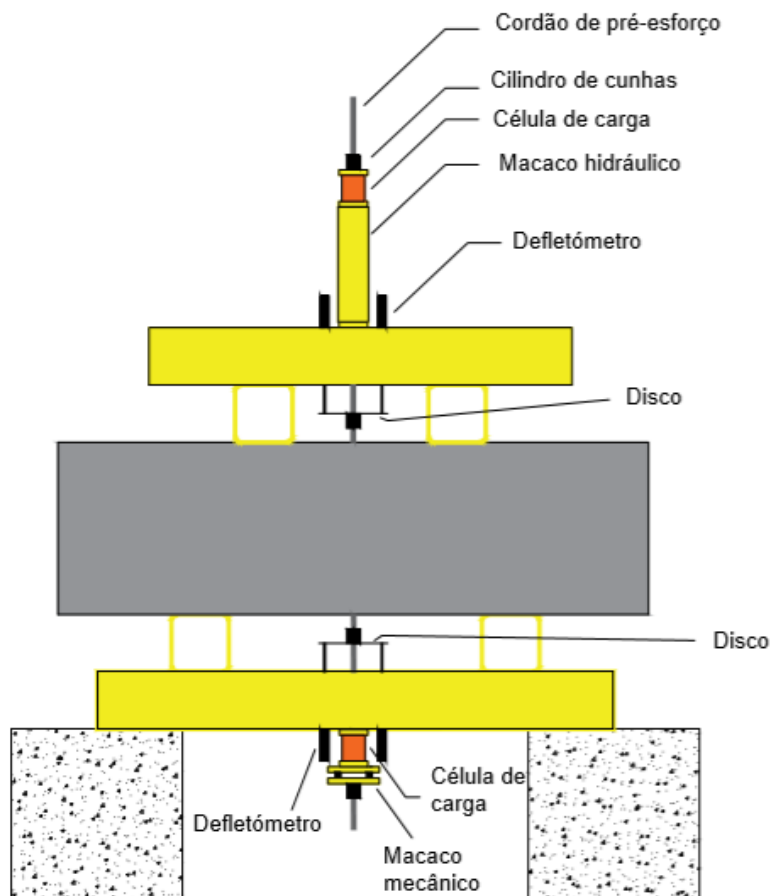


Figura 3.9 - Esquema do ensaio

Tanto as células de carga como os defletômetros estão ligados a um aparelho de aquisição de dados, neste caso utilizou-se o spider8, (Figura 3.10), que, por sua vez, está ligado ao computador, tornando possível a visualização dos dados através do *software* Catman.



Figura 3.10 - Aparelho de aquisição de dados Spider8

### 3.3.6 Aplicação de pré-esforço e injeção da resina

Depois do sistema de ensaio montado, dá-se início à fase de pré-esforço. Como se pode observar na Figura 3.8, o pré-esforço será aplicado com um macaco mecânico de três parafusos, sendo que, à medida que se vão apertando os parafusos as chapas metálicas vão-se afastando uma da outra fazendo força contra os perfis metálicos e contra o cilindro de cunhas inserido no cordão.

Para os ensaios monotônicos, aplicou-se uma força de 125 kN nos três primeiros e de 150 kN nos três seguintes. Nos cíclicos aplicou-se a força que conduziu a uma maior capacidade de carga. Para o cordão ficar com a tensão desejada instalada, foi necessário aplicar uma força superior à requerida (por exemplo, se se pretende uma força instalada de 125 kN, aplica-se 130 kN pois, devido às perdas instantâneas do aço de pré-esforço, tal como a reentrada das cunhas e relaxação instantânea, o cordão irá perder tensão).

Por se pretender que, aquando da injeção, o cordão não perca mais tensão, a injeção é feita no dia seguinte à aplicação do pré-esforço, permitindo que haja tempo para se darem as perdas instantâneas, fazendo com que a tensão existente no cordão esteja estabilizada.

Antes de se dar início à injeção foi necessário selar a extremidade inferior do furo para tornar possível a ascensão da resina pelo interior do furo. Esta selagem é constituída por dois materiais, massa de poliéster e gesso. Antes de se aplicar qualquer um destes materiais é necessário colocar o tubo de bisel em posição de injeção, isto é, introduziu-se o tubo no roço criado após a fase de furação. De forma a facilitar este processo cortou-se a ponta do tubo com uma determinada inclinação, (Figura 3.11), permitindo uma fácil inserção entre o cordão e a parede do furo.



Figura 3.11 - Tubo de bisel cortado

Depois de fixar o tubo foi aplicada uma primeira camada de massa de poliéster misturada com endurecedor para tapar todos os espaços vazios. Após a cura foi aplicada outra camada e assim sucessivamente. Depois da cura da última camada de betume, foi repetido o processo utilizando gesso. Depois de o gesso estar seco deu-se, então, início à injeção da resina. A

Efeito da força de pré-esforço inicial no comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência

injeção foi feita com uma pistola elétrica, (Figura 3.12), de forma a injetar a resina a uma velocidade constante e a não ser necessário premir o gatilho repetidamente.



Figura 3.12 - Pistola elétrica de injeção

Esta fase deu-se por terminada quando, na extremidade superior do furo, começa a sair resina conforme ilustrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Excesso de resina

Terminada a injeção retirou-se a pistola do misturador com cuidado para evitar salpicos ou derrames da resina. O ensaio teve início 48 horas depois do final deste processo.



## **4. Análise de resultados**

### **4.1 Introdução**

De modo a tirar conclusões plausíveis dos resultados obtidos, foi necessário abordar vários assuntos e definições. Até ao presente capítulo foram abordados muitos fatores importantes no comportamento das ancoragens aderentes. Apesar do sistema de ancoragem estudado no presente trabalho não ser comumente utilizado, assume-se que, depois de alguns estudos efetuados, os fatores influentes sejam semelhantes aos abordados anteriormente.

Neste capítulo serão apresentados e analisados os ensaios efetuados, sendo estes transferência de pré-esforço e arrancamento, comparando com os resultados obtidos por Vilhena [4].

### **4.2 Características dos ensaios**

Para indicar se se trata do ensaio monotónico ou do cíclico foram criadas as siglas NRM e NRC, respetivamente. À frente destas siglas estará o número correspondente à força aplicada e ao número do ensaio. Por exemplo, para definir o primeiro ensaio monotónico de 125 kN usa-se a sigla NRM125-1. Todos os ensaios foram realizados com uma temperatura ambiente entre 24 e 27°C.

O ensaio NRM125-1 não será analisado devido ao resultado discrepante em comparação com os outros dois ensaios de 125 kN. Este resultado derivou de um escorregamento precoce do cordão e de pouca folga entre o perfil metálico e a chapa sobre a célula de carga inferior.

### **4.3 Transferência do pré-esforço (*Push-in*)**

Como referido anteriormente, a transferência de pré-esforço ocorre quando se liberta o macaco mecânico. A perda de adesão ocorre nesta fase assim que o cordão se desloca. Durante o processo de transferência de força para a resina ocorreram perdas de força que podem ser observadas nos gráficos que serão apresentados nesta secção.

A transferência de pré-esforço dá-se por concluída assim que a célula de carga inferior não registar força. A força transmitida resulta da diferença entre a força na célula de carga superior e a força na célula de carga inferior.

Os gráficos dos ensaios transferência de pré-esforço tanto dos monotónicos como dos cíclicos são apresentados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. As curvas de cada gráfico referem-se aos deslocamentos registados pelos defletómetros de cima e de baixo.

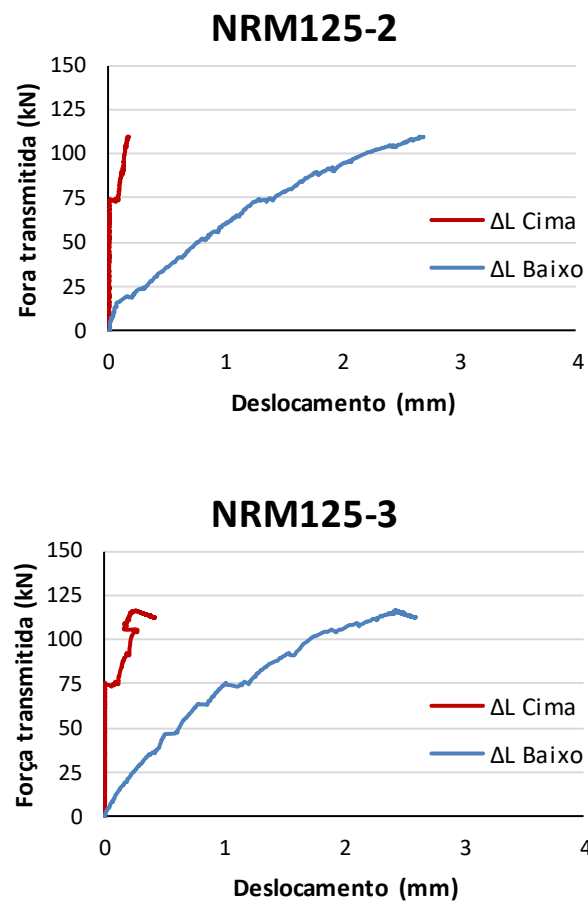


Figura 4.1 - Ensaio de transferência de pré-esforço de 125 kN (Relação Força - Deslocamento)

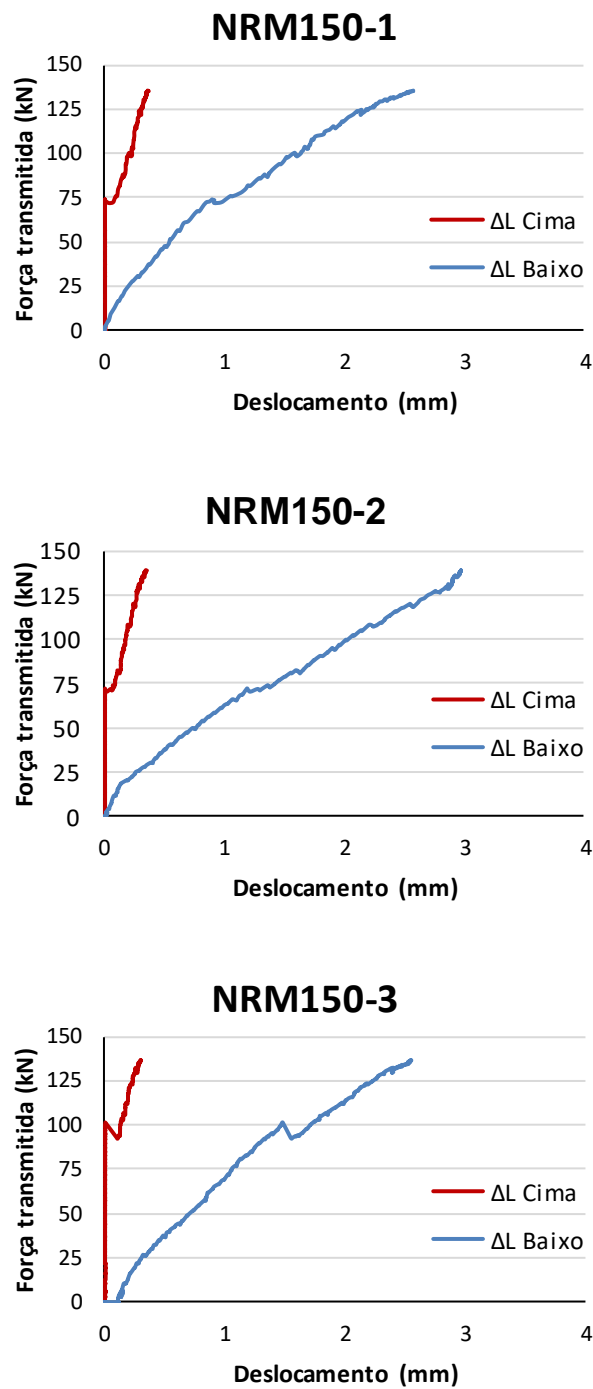


Figura 4.2 - Ensaio de transferência de pré-esforço de 150 kN (Relação Força - Deslocamento)

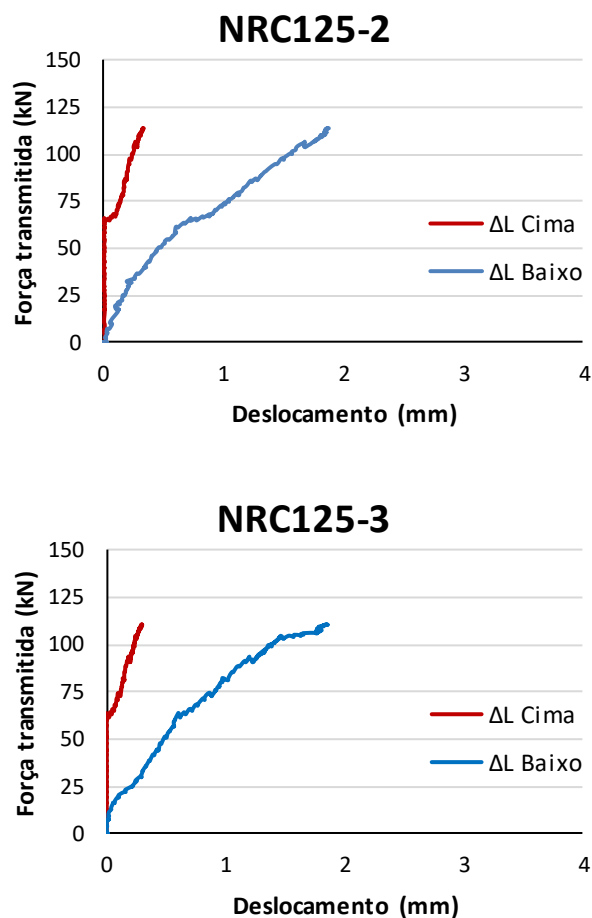


Figura 4.3 - Ensaio de transferência de pré-esforço cíclicos de 125 kN (Relação Força - Deslocamento)

Como se pode observar nos gráficos referentes aos ensaios com uma força de pré-esforço de 125 kN, (Figura 4.1 e Figura 4.3), a força transferida é menor do que a força inicialmente instalada. Cada um destes perdeu cerca de 12 kN, o que representa, aproximadamente, 10% da força de pré-esforço.

Nos ensaios com uma força de pré-esforço de 150 kN a força após a transferência de pré-esforço difere cerca de 15 kN da força inicial de pré-esforço, representando, também, 10% da mesma.

Estes resultados foram comparados com os de Vilhena [4] e concluiu-se que, mesmo para um aumento de força de 25 e 50 kN, a percentagem de perdas manteve-se a mesma. Seria de esperar um aumento de perdas com o aumento de pré-esforço.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 apresenta-se a relação das forças registadas entre as duas células de carga durante a fase de transferência de pré-esforço.



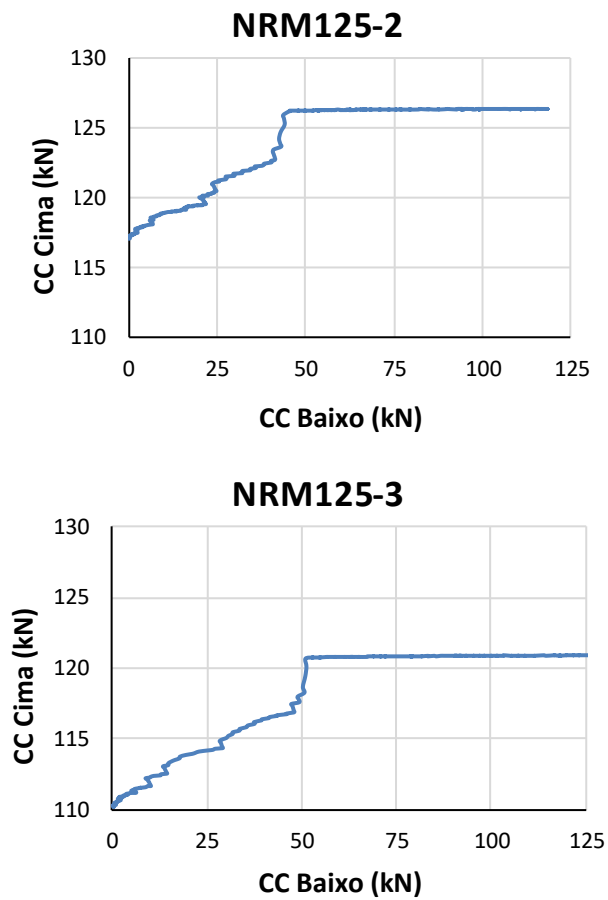


Figura 4.4 - Relação das forças registadas entre as duas células de carga durante a fase de transferência de pré-esforço nos ensaios de 125 kN

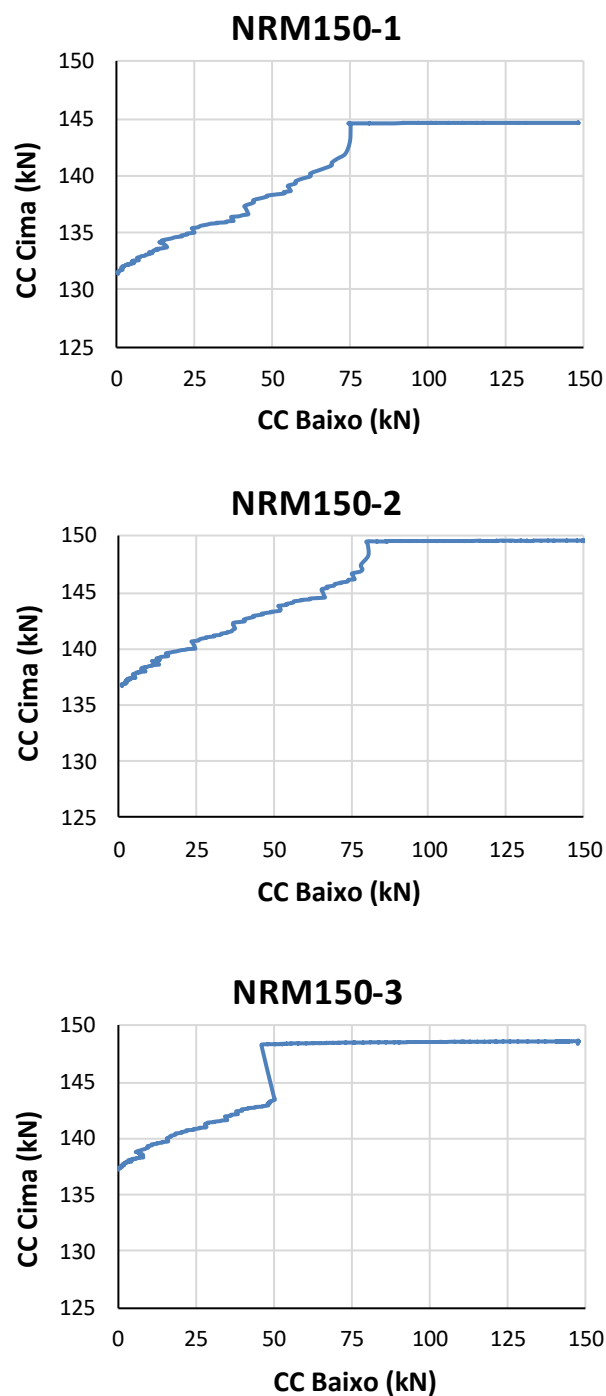


Figura 4.5 - Relação das forças registadas entre as duas células de carga durante a fase de transferência de pré-esforço nos ensaios de 150 kN

Como se pode observar nas Figuras 4.4 e 4.5, a célula de carga superior raramente atingiu a força pretendida. Isto deveu-se ao facto de, durante o pré-esforço, as células não registarem a mesma força e, desta forma, tentou-se que a média das duas forças registadas fosse igual a 125 ou 150 kN, consoante o caso.

Pela Figura 4.4, deduz-se que, em ambos os casos, a célula de carga superior só começa a perder força a partir aproximadamente dos 50 kN, ou seja, a célula de carga inferior perde cerca de 60% da força até se fazer notar algum decréscimo na célula de carga superior.

No caso dos ensaios de 150 kN foi necessária uma perda de apenas 50% da força da célula inferior para se fazer sentir na parte superior do sistema. É de notar que no ensaio NRM125-3 ocorreu uma incoerência na transferência de pré-esforço como se pode observar na Figura 4.5. A força em cima só começou a diminuir depois de se perder 70% da força em baixo e, seguido desta perda, a força na célula inferior aumentou 5 kN.

#### **4.4 Ensaios de arrancamento (*Pull-out*)**

O ensaio de arrancamento é realizado imediatamente após o ensaio de transferência de pré-esforço. Depois de transferida toda a força, a parte inferior do ensaio (célula de carga, macaco mecânico e cilindro de cunhas) não é retirada, isto é feito de modo a impedir que, durante o arrancamento, o cordão seja projetado para cima. Em vez de se desmontar, desapertam-se os parafusos do macaco mecânico de forma a criar espaço suficiente para o cordão poder deslizar até à rotura da ligação. Aplicou-se a força com incrementos de 0,2 kN/s até à rotura.

Os resultados em seguida apresentados referem-se à fase imediatamente após a transferência de pré-esforço.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 apresentam-se as relações força-deslocamento para os ensaios de arrancamento, com forças iniciais de pré-esforço de 125 kN e 150 kN, respetivamente.

Como se pode observar na Figura 4.6, no ensaio NRM125-2 não se consideraram os dados adquiridos pelos defletómetros inferiores, isto porque, a partir de cerca dos 25 mm de deslocamento, a curva começou a afastar-se consideravelmente da curva dos deslocamentos superiores. É também de salientar que nos ensaios NRM150-1 e NRM150-2 ocorreram perturbações nos defletómetros inferiores. No primeiro não se contabilizou a totalidade dos dados porque a partir de, aproximadamente, 13 mm os deslocamentos começaram a diminuir à medida que a força aumentava. No ensaio NRM150-2 os valores registados pelos defletómetros inferiores mostram um aumento e uma diminuição repentina de deslocamentos sem qualquer aumento de carga. Presume-se que ambas as anomalias se devam a erros de leitura.

No ensaio NRM150-2 um dos defletómetros da extremidade inferior caiu, o que se deveu ao mau contacto entre o íman e o perfil metálico. No mesmo não foi possível obter resultados fidedignos a partir dos defletómetros inferiores.

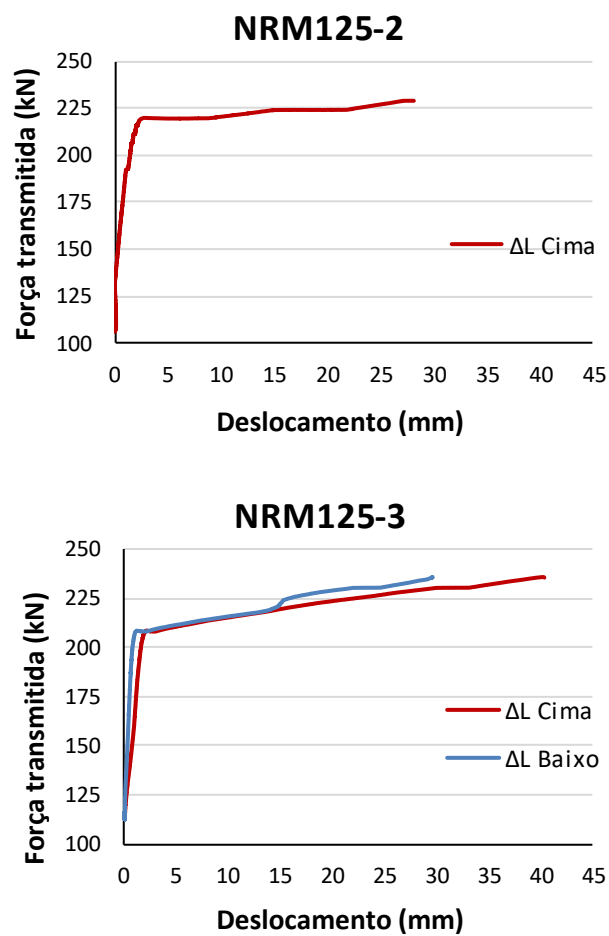


Figura 4.6 - Gráficos de Arrancamento de 125 kN (Força vs Deslocamento)

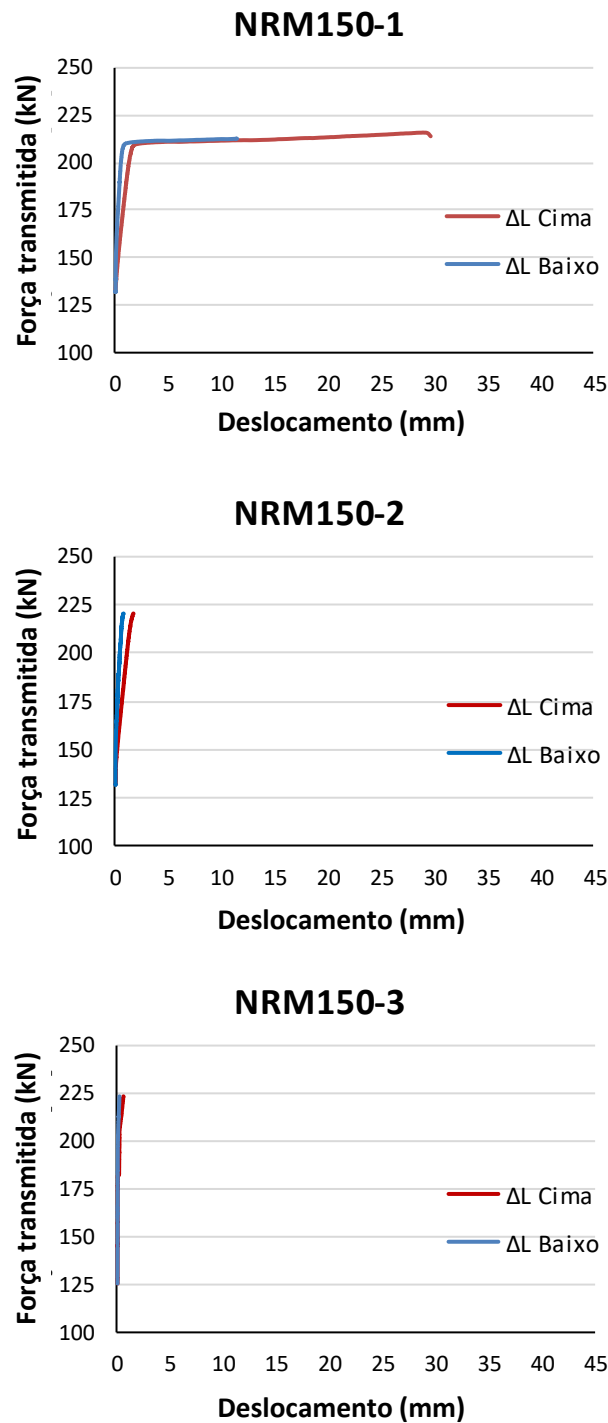


Figura 4.7 - Gráficos de Arrancamento de 150 kN (Força vs Deslocamento)

Como se pode observar, na maioria dos casos, a rotura ocorre na fase plástica do sistema, ou seja, na fase em que um pequeno aumento de força provoca um grande aumento de deslocamento. Nos ensaios NRM150-2 e 3, a rotura deu-se na fase elástica e superou a força última atingida pelo ensaio NRM150-1. Como se pode ver na Figura 4.7, no ensaio NRM150-

1, a fase elástica atinge aproximadamente os 213 kN, enquanto que nos outros dois ensaios esta fase atinge cerca de 225 kN.

As Figuras 4.8 e 4.9 contêm os gráficos das linhas de tendência dos ensaios monotónicos e as respetivas equações para facilitar a comparação entre as várias retas.

De um modo geral as retas correspondentes ao deslocamento inferior possuem um declive mais acentuado do que as referentes ao deslocamento superior, tal acontecimento seria espectável uma vez que, sendo que a parte inferior do sistema perde a adesão antes da parte superior, esta começa a deslizar primeiro e, assim sendo, é a primeira parte a perder a resistência ao deslizamento, conduzindo a deslocamentos maiores para menores forças.

É de notar que as retas situadas na fase elástica possuem declives muito semelhantes, à exceção do ensaio NRM150-3, em que como se pode ver pela escala deste gráfico, este foi aproximado para se poder ver o comportamento deste caso com mais detalhe.

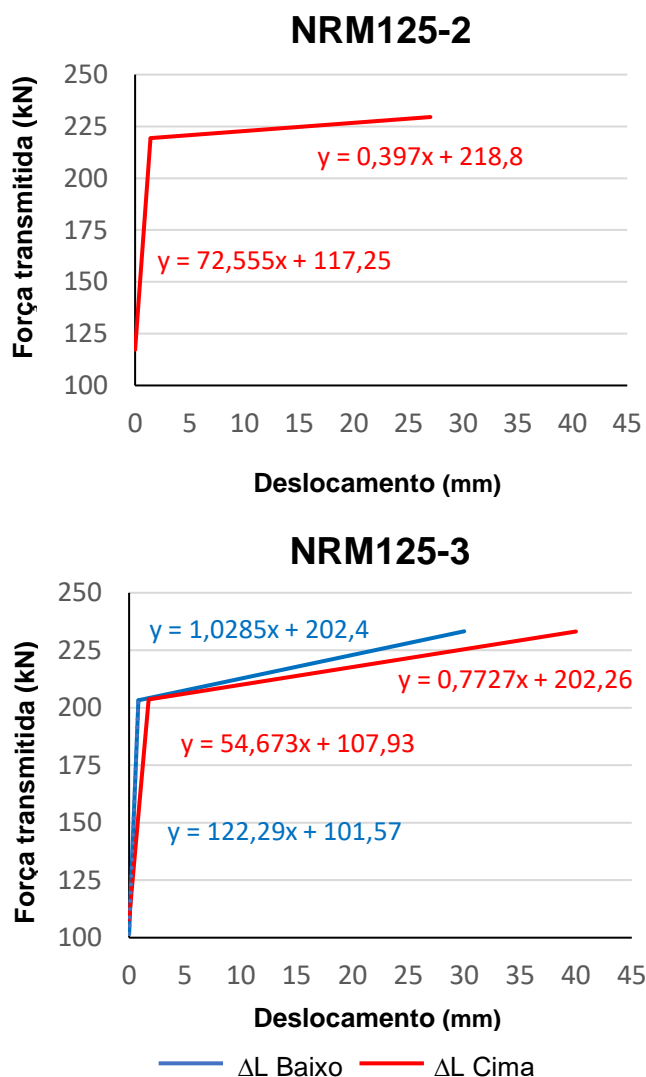


Figura 4.8 - Linhas de tendência da fase de Arrancamento dos ensaios de 125 kN

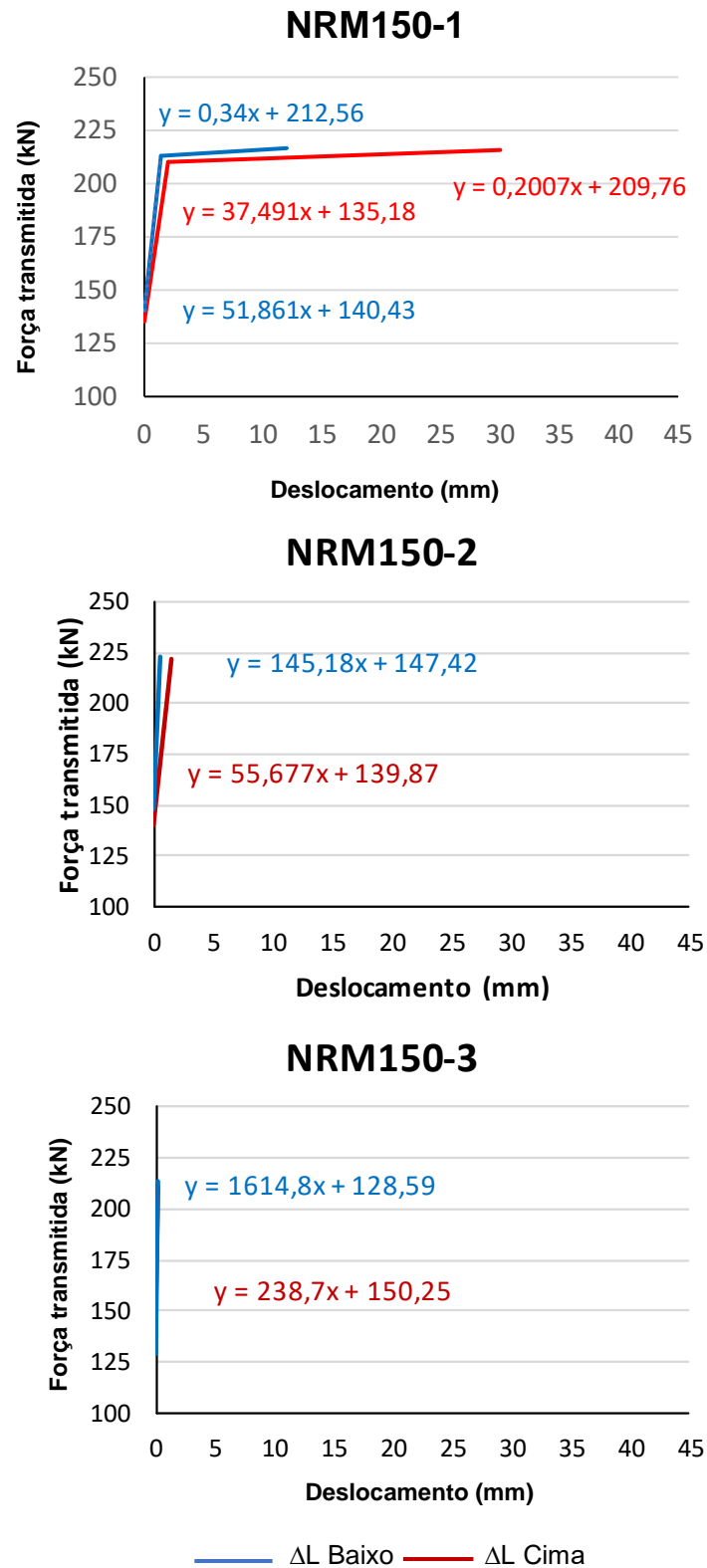


Figura 4.9 - Linhas de tendência da fase de Arrancamento dos ensaios de 150 kN

A Figura 4.10 representa as linhas de tendência médias da fase de arrancamento dos ensaios NRM125 e NRM150.

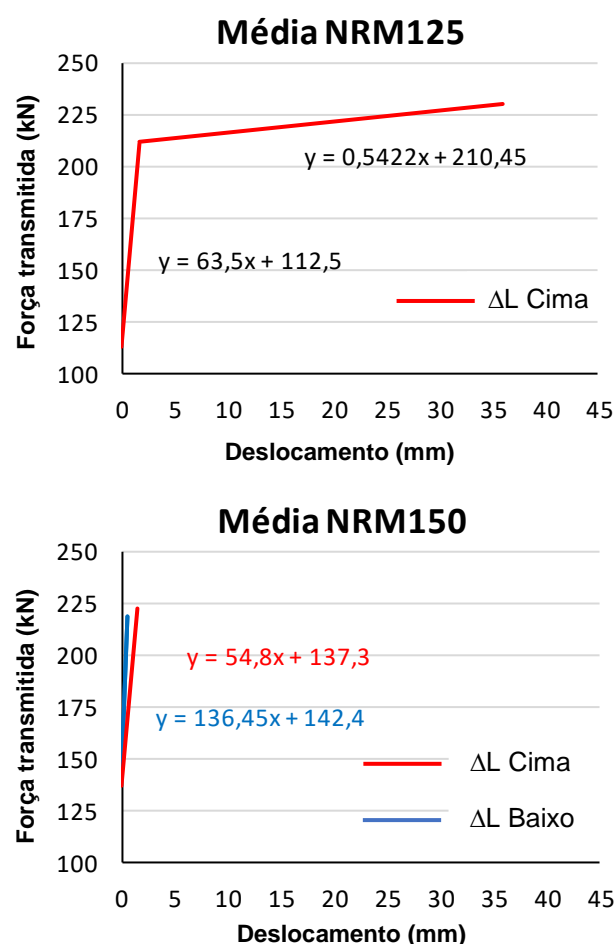


Figura 4.10 – Linhas de tendência médias dos ensaios de arrancamento de NRM125 e NRM150

As Figuras 4.11 e 4.12 envolvem a relação entre os deslocamentos superiores e inferiores de cada ensaio. Como se pode observar pelos gráficos apresentados, e como referido previamente, os primeiros deslocamentos a serem registados dizem respeito à parte inferior do sistema. A partir deste primeiro patamar em que só existem deslocamentos em baixo, pode observar-se uma relação quase linear entre ambos os deslocamentos.

Destaca-se o gráfico do ensaio NRM150-2 na Figura 4.12 que, devido ao reduzido deslocamento superior, diminuiu-se a escala para permitir uma melhor análise.



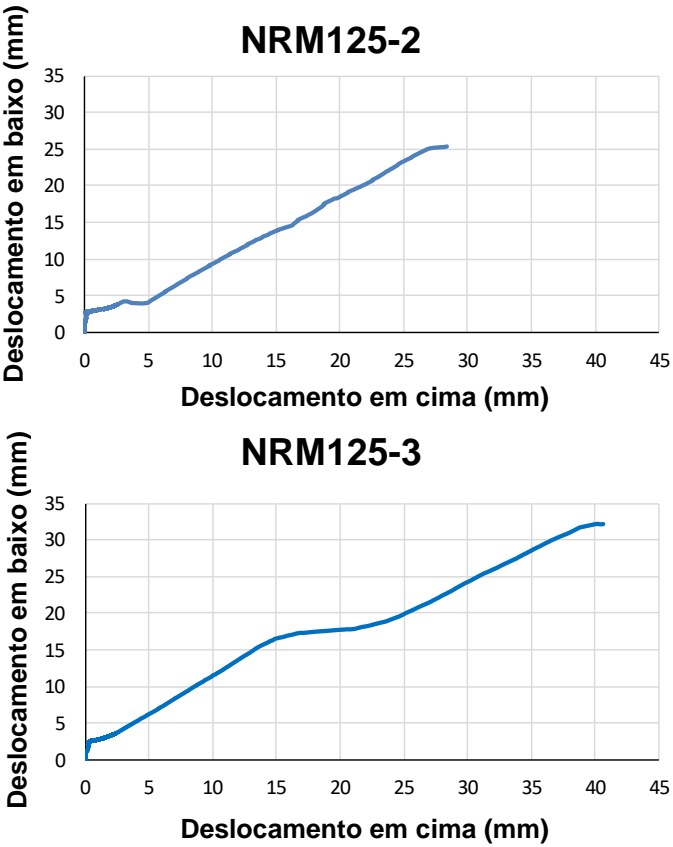


Figura 4.11 - Relação entre os deslocamentos superiores e inferiores dos ensaios de 125 kN

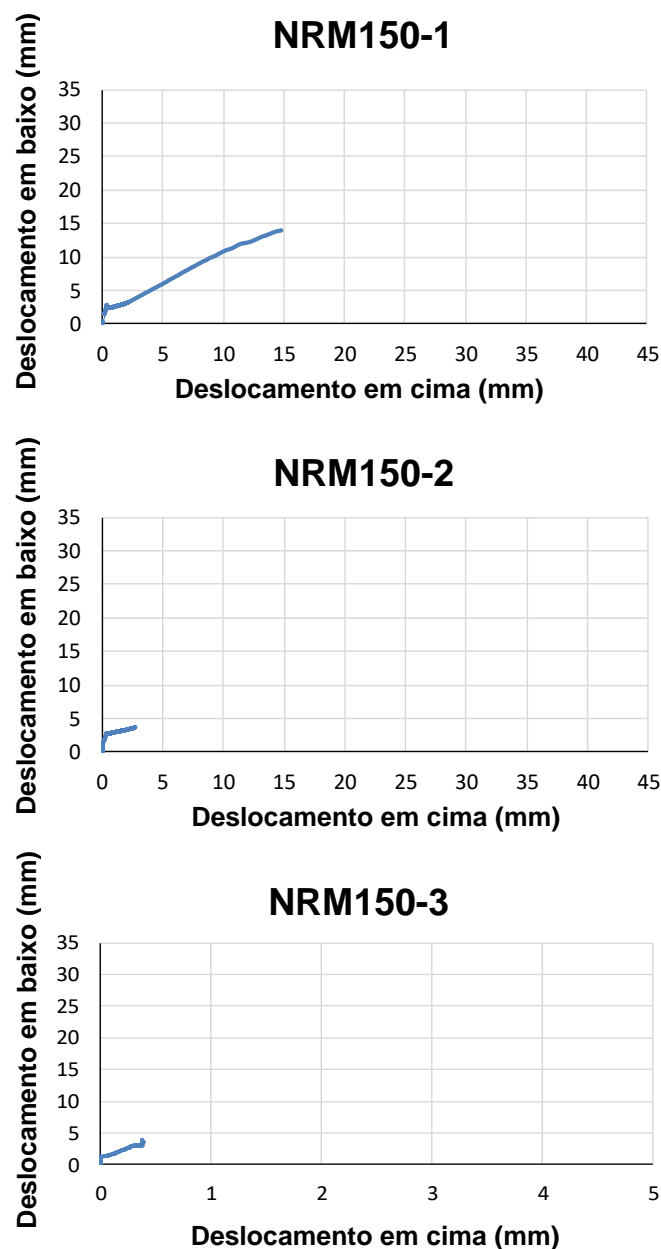


Figura 4.12 - Relação entre os deslocamentos superiores e inferiores dos ensaios de 150 kN

## 4.5 Ensaios cíclicos

A Figura 4.12 apresenta um exemplo da história de carga dos ensaios cíclicos efetuados, e como se pode observar, cada ciclo é composto por três carregamentos e três descargas que, depois de concluído, dá início ao próximo ciclo. O primeiro ciclo varia entre o incremento e o decremento de 15 kN ao valor residual de pré-esforço. Seguindo este, a variação de carga aumenta 15 kN, realizando este procedimento sucessivamente até as perdas de pré-esforço serem superiores a 50%, procedendo-se então ao arrancamento do cordão.

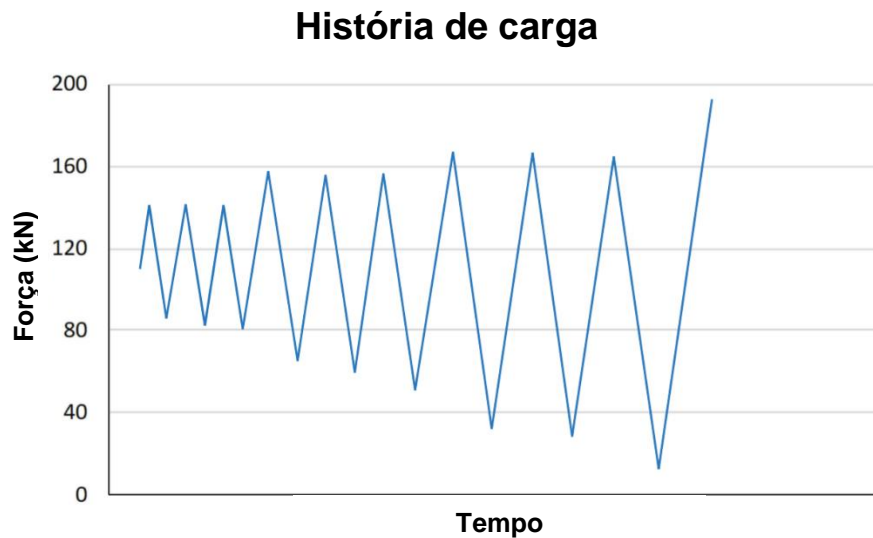


Figura 4.13 - História de carga dos ensaios cíclicos

Como é observável na Figura 4.13 desde o primeiro ciclo que a variação de carga não correspondeu ao pretendido, variando cerca de 35 kN desde o valor residual de pré-esforço e, sendo que isto sucedeu em todos os ensaios cíclicos, deduziu-se que não foi um erro cometido pelo operador ao inserir os comandos na unidade de controlo de pressão hidráulica, mas sim uma anomalia da mesma.

Os picos de descarga do segundo e terceiro ciclo não foram constantes ao longo dos mesmos e, ao entrar no terceiro ciclo, nota-se que o aumento da variação de carga já foi menor do que 15 kN enquanto que na descarga a diferença ultrapassou os 15kN em relação ao segundo ciclo.

Em 2.6 foi mostrou-se a influência que a história de carga tem na força de ligação da ancoragem. Apesar de só se ter abordado a influência do número de ciclos, é muito provável a força aplicada em cada ciclo seja condicionante para o bom comportamento do sistema.

É possível que tenha sido por estes motivos que os ensaios cíclicos não apresentaram um comportamento fiável e conclusivo.

Os ensaios cíclicos apresentaram os comportamentos representados nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

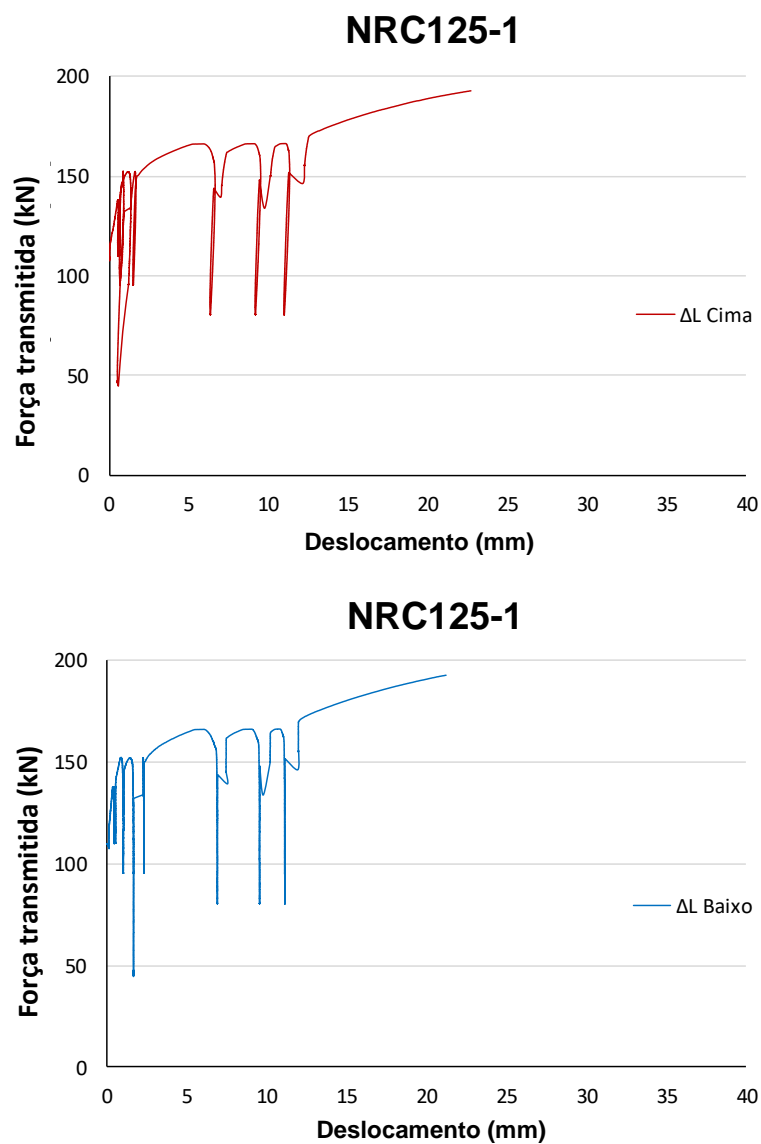


Figura 4.14 - Relações Força - Deslocamento do ensaio NRC125-1

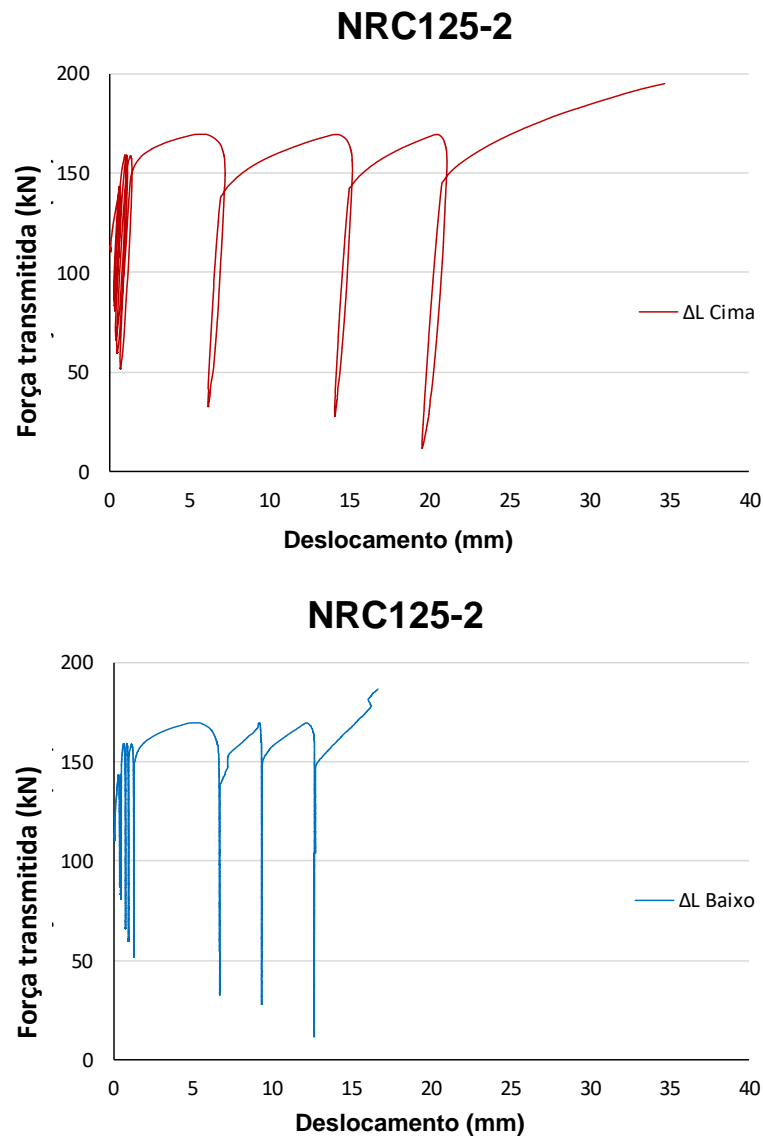


Figura 4.15 - Relações Força - Deslocamento do ensaio NRC125-2

No ensaio NRC125-1, um dos defletômetros da extremidade inferior caiu devido a um movimento brusco do cordão que provocou um som de impacto. Este movimento ocorreu mais duas vezes ao longo deste ensaio e sempre durante o período de carga. No ensaio NRC125-1, não foi possível guardar os dados do início do ensaio devido a uma anomalia do aparelho de aquisição de dados.

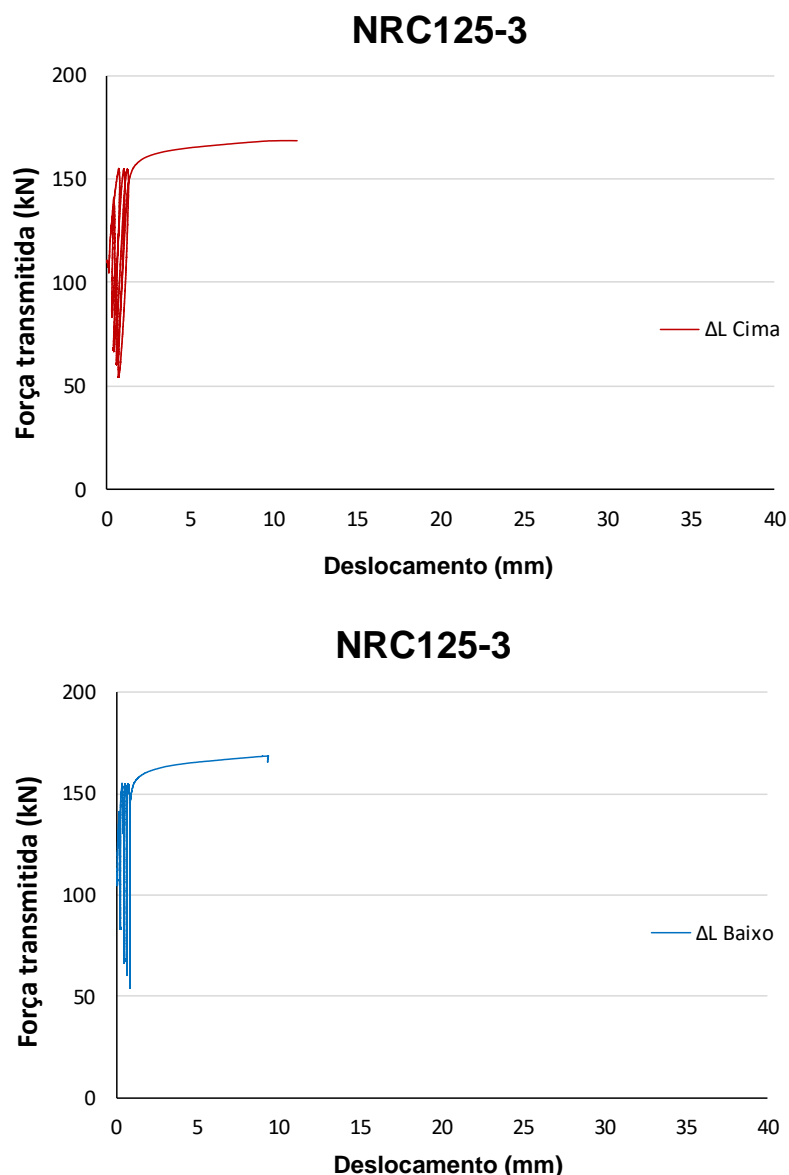


Figura 4.16 - Relações Força - Deslocamento do ensaio NRC125-3

No ensaio NRC125-3 uma anomalia na unidade de controlo de pressão hidráulica fez com que os ciclos de força não fossem iguais aos anteriores, o que possivelmente provocou a diminuição significativa da força última, como se pode observar na Figura 4.16.

Como se pode observar pelos gráficos apresentados acima, os ensaios cíclicos não mostraram grande consistência entre eles. Tal comportamento deve-se ao facto de o sistema ter entrado em fase plástica muito cedo no carregamento.

Para facilitar a análise e, de forma a mostrar que a fase plástica ocorre mais cedo do que o expectável, reduziu-se a escala dos deslocamentos até à entrada na fase plástica, introduzindo linhas de tendência no início do carregamento e no primeiro troço da fase plástica. Estas são apresentadas na Figura 4.17.

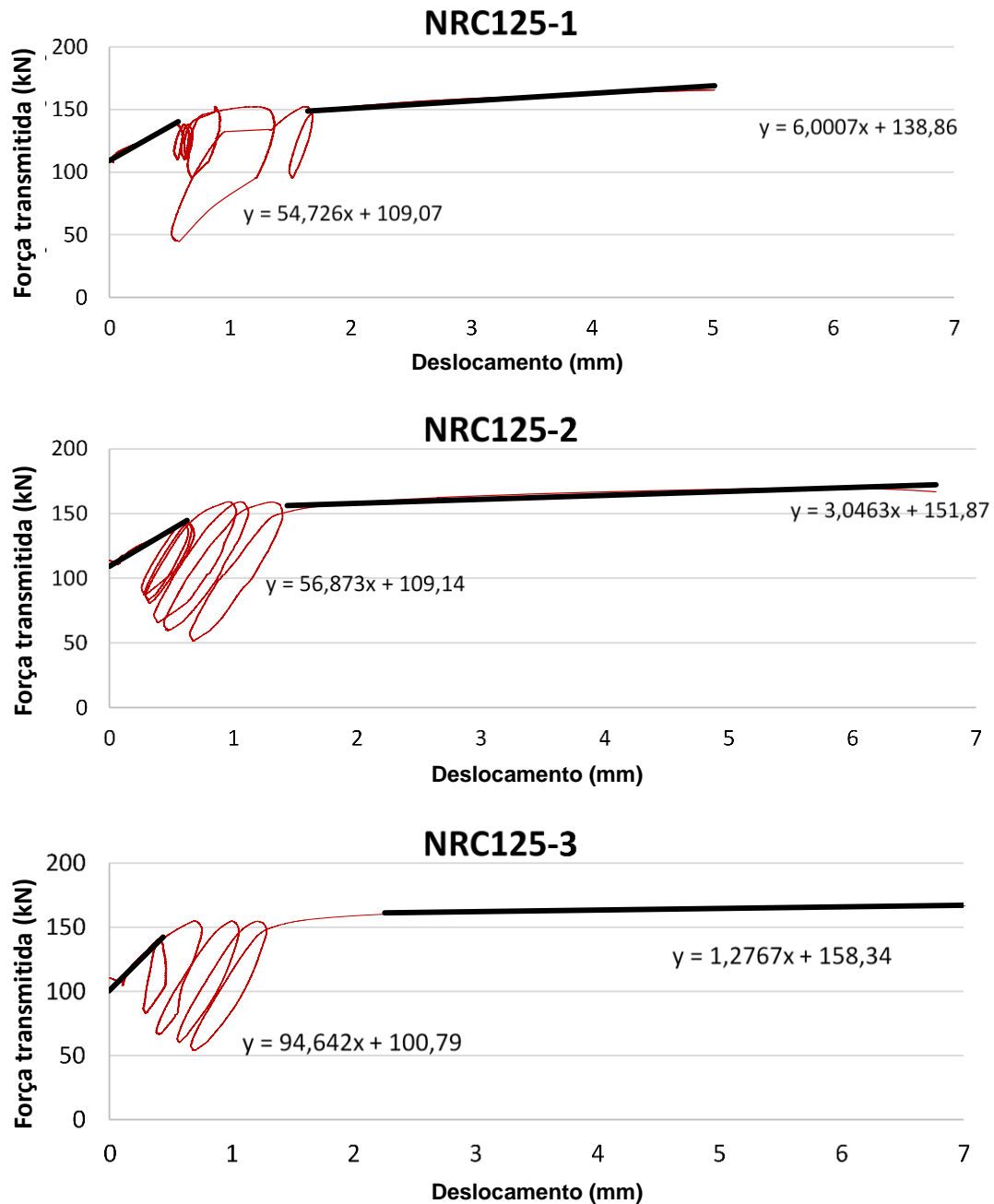


Figura 4.17 - Linhas de tendência dos ensaios cíclicos

Note-se que os declives das linhas de tendência correspondentes ao primeiro carregamento encontram-se na mesma ordem de grandeza das que já foram apresentadas na Figura 4.8 e Figura 4.9. Pela análise da Figura 4.17 pode observar-se que a partir do deslocamento de 2 mm todos os ensaios já se encontravam na fase plástica, como se pode ver pela horizontalidade na linha de tendência. Confirma-se, pela Figura 4.17, que a partir dos 2 mm já se estava a iniciar o terceiro ciclo, ou seja, é no início do terceiro ciclo que o sistema entra em fase plástica. Nas Figuras 4.16 e 4.17 observa-se que, no ensaio NRC125-3, não foram realizados todos os ciclos que foram aplicados nos restantes dois ensaios.

Na Tabela 4.1 são apresentados valores provenientes da fase de transferência de pré-esforço e da fase de arrancamento de cada ensaio.

Tabela 4.1 – Valores dos ensaios transferência de pré-esforço e arrancamento

Ensaio	Nº	Força após <i>Push-in</i> (kN)	$\Delta L$ push-in Cima (mm)	$\Delta L$ push-in Baixo (mm)	$\Delta L$ máx Cima (mm)	$\Delta L$ máx Baixo (mm)	Força última (kN)
NRM125	2	108,9	0,8	2,7	29,3	25,6	229,6
	3	115,6	1,0	2,5	41,8	32,1	236,1
	Média 125	112,3	0,9	2,6	35,6	28,9	232,9
NRM150	1	134,7	1,2	2,6	31,2	13,9	216,0
	2	139,4	1,1	3,0	4,4	-	220,7
	3	133,7	1,2	2,5	5,4	22,3	223,1
	Média150	135,9	1,2	2,7	13,7	18,1	219,7
NRC125	1	-	-	-	28,7	25,1	198,7
	2	113,5	1,0	1,9	36,4	19,0	195,2
	3	110,8	1,0	2,1	21,7	11,4	168,6
	Média Cíclicos	112,9	1,1	2,2	28,9	18,5	187,4

Como se pode observar na Tabela 4.1, os valores da força última obtidos pelos ensaios de 125 kN são superiores aos de 150 kN. Contudo, os deslocamentos obtidos em dois dos ensaios de 150 kN foram muito menores do que os de 125 kN visto que estes não entraram em fase plástica e atingiram a força última em fase elástica. Como nem todos os ensaios de 150 kN apresentaram o mesmo comportamento e, como numa estrutura real é preferível uma rotura plástica e não elástica, resolveu-se realizar os ensaios cíclicos com um pré-esforço de 125 kN.

Os ensaios monotónicos de Vilhena [4] resultaram numa força última média de 207 kN, o que prova que o aumento da força de pré-esforço tem influência na resistência do sistema de ancoragem.



É de notar que os ensaios cíclicos resultaram na diminuição da força última e no aumento significativo dos deslocamentos durante o carregamento em relação aos monotónicos. Como seria de esperar, e como referido em 2.6, o número de ciclos aplicados é um fator de grande importância em relação à resistência de ligação da ancoragem.

Concluiu-se, pelas curvas dos ensaios cíclicos, que a rotura ocorreu por fadiga. Caso não tivesse sucedido, previa-se que o arrancamento do cordão após a aplicação da carga cíclica, resultasse numa reta aproximada de declive semelhante às dos ensaios monotónicos.

## **4.6 Comparação com os resultados de Vilhena [4]**

Na Figura 4.18 apresenta-se a comparação entre os resultados dos ensaios monotónicos realizados, com os ensaios de Vilhena [4] de 500mm de comprimento de embebimento. Os ensaios de Vilhena [4] estão identificados com a inicial do autor, comprimento aderente e número do ensaio (por exemplo, TV5001 refere-se ao primeiro ensaio com um comprimento aderente de 500 mm). Os resultados do presente trabalho estão identificados de forma semelhante, mas depois das iniciais é indicada a força de pré-esforço e o número do ensaio (por exemplo, NR125-1, referindo-se ao primeiro ensaio com uma força de pré-esforço de 125 kN). Esta comparação diz respeito apenas à fase de arrancamento do cordão.

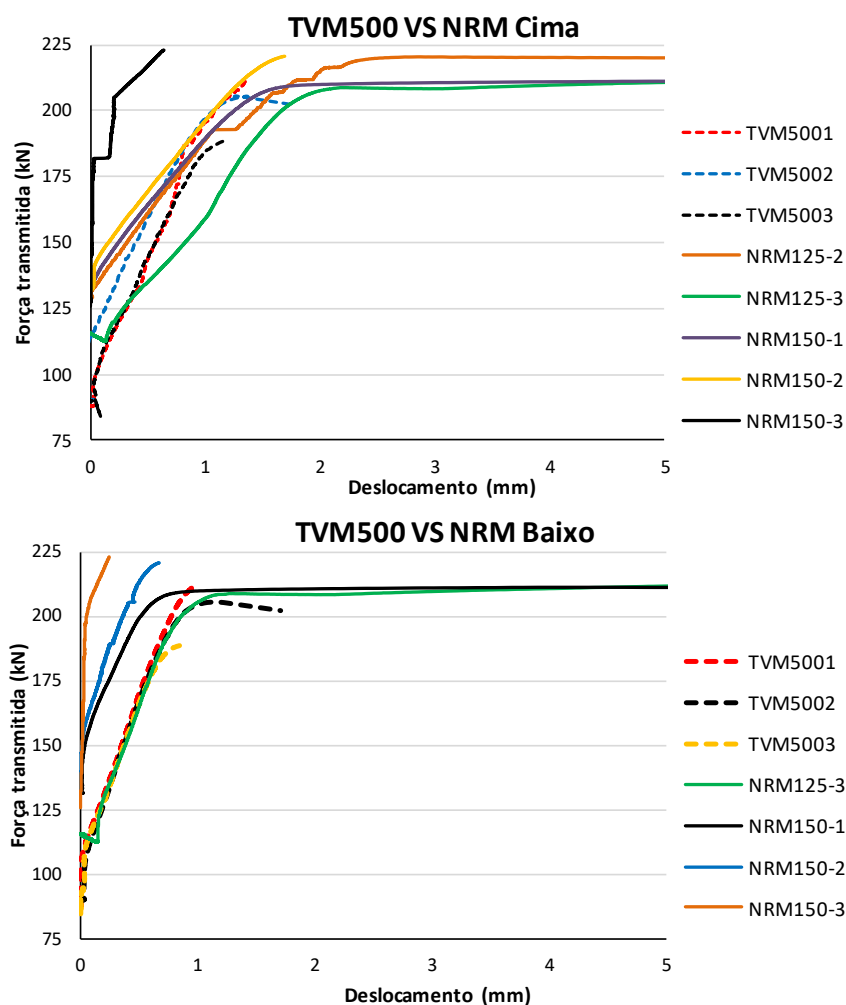


Figura 4.18 - Comparação dos ensaios monotónicos com os ensaios de Vilhena [4]

Como se pode observar na Figura 4.18, a maioria das curvas apresenta a mesma trajetória apesar de os seus pontos de origem não serem coincidentes. Note-se que não foram comparados os dados adquiridos após os 2 mm de deslocamento, isto foi devido ao facto de os ensaios de Vilhena [4] não terem ultrapassado este valor à exceção do 5003, que, apesar de ter continuação, os restantes resultados são muito discrepantes e não permitem uma análise comparativa. Como referido anteriormente, a fase plástica inicia-se pouco antes dos 2mm de deslocamento e, como se pode verificar por ambos os gráficos, os ensaios de Vilhena [4] terminam assim que o sistema entra na fase plástica.

Como se pode observar na Figura 4.18, apesar de não se apresentar a totalidade de todas as curvas referentes aos ensaios do presente trabalho, pode aferir-se que, com o aumento de pré-esforço de 100 kN para 125 kN, houve uma grande melhoria no desempenho do sistema. Todos os ensaios NRM atingiram forças últimas superiores às dos ensaios TVM e, a rotura dos mesmos ocorreu, maioritariamente, na fase plástica.

Não se compararam os ensaios cíclicos pois estes apresentaram comportamentos muito diferentes dos de Vilhena [4], tornando-os incomparáveis.

## 4.7 Carotes dos ensaios

De forma a suportar algumas hipóteses referidas anteriormente, foram retirados carotes de dois dos ensaios, do NRM125-1 e do NRM150-1. Este processo foi semelhante ao da furação do betão para a inserção dos cordões, mas com uma broca de maior diâmetro como se pode ver na Figura 4.19.



Figura 4.19 - Furação dos carotes

Partes dos carotes não permaneceram intactas durante o processo de extração, impossibilitando a análise completa dos mesmos. Ainda assim foi possível confirmar algumas das hipóteses previamente estabelecidas.

Devido ao insuficiente comprimento da broca disponível, foi necessário furar a partir das duas extremidades, ou seja, primeiro furou-se cerca de  $\frac{3}{4}$  do comprimento, tendo-se de seguida virado o bloco e furou-se o restante comprimento. Como os furos não coincidiram teve de se martelar o carote para este sair do bloco. Enquanto se martelava observou-se a descida do cordão, enquanto o carote e a resina permaneceram na mesma posição. Concluiu-se então que a perda de aderência ocorreu na interface aço-resina.

A Figura 4.20 refere-se à parte superior do ensaio que apresenta fendas no betão localizadas na mesma posição, sendo esta junto à armadura longitudinal. É possível que esta fenda diga respeito à hipótese da formação de um cone de betão abordada anteriormente, uma vez que

se situa a cerca de 6cm da superfície do bloco. Caso não se tivesse previsto um comprimento não aderente junto às extremidades, seria provável a ocorrência de rotura pela formação deste cone.



Figura 4.20 - Fendas no betão observadas após extração dos carotes

Ainda na Figura 4.20 é facilmente visível que os cordões atravessam a armadura longitudinal. Este facto pode ter condicionado a resistência do bloco, levando desta forma à formação de fendas ao redor dos cordões. A Figura 4.21 mostra o estado do varão pertencente à armadura longitudinal. É claro que este varão levará a uma diminuição da aderência e consequentemente da resistência ao arrancamento do codão. Dado que os furos estão todos alinhados, pode concluir-se que este fenómeno se verificou em todos os ensaios.

A Figura 4.21 mostra ainda a excentricidade do cordão em relação ao furo, o que conduz a uma espessura não uniforme da resina à volta do cordão.



Figura 4.21 - Varão de aço furado

## 5. Conclusões

### 5.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo sintetizar e expor o que se concluiu com o estudo realizado para melhor compreensão do desempenho do sistema de ancoragens de cordões de aço pré-esforçados, sendo o agente químico resina epoxídica.

### 5.2 Conclusões

Com o presente trabalho foi possível compreender a importância de alguns fatores para o desempenho do sistema de ancoragem estudado em relação aos ensaios realizados no passado.

Verificou-se que, com o aumento da força de pré-esforço de 100 kN para 125 kN, a força última aumentou cerca de 12%. No entanto, quando se aumentou a força de pré-esforço para 150 kN, a força última decresceu cerca de 5% do que tinha atingido com 125 kN. Note-se que estes valores são referentes à média das forças últimas de cada ensaio. Como apenas foram realizados três ensaios de cada tipo, não se tendo observado o mesmo comportamento em todos estes, torna-se difícil de garantir que outros ensaios realizados apresentem resultados semelhantes.

Uma vez que este sistema se destina ao reforço de estruturas, é de elevada importância o seu modo de rotura. Os ensaios de 125 kN mostraram-se superiores na força última e vantajosos no modo de rotura, porque, apesar de apresentarem deslocamentos muito mais elevados, a rotura ocorreu na fase plástica, o que se torna preferível em qualquer tipo de estrutura.

Concluiu-se que, para os ensaios monotónicos, um aumento da força de pré-esforço de 100 kN para 125 kN torna-se vantajoso, provocando um aumento significativo na resistência da ligação da ancoragem. Também foi provado que, para um comprimento de amarração de 500 mm, uma força de pré-esforço próxima de 150 kN não tem tanta eficácia como uma força de pré-esforço de 125 kN.

No caso dos ensaios cíclicos apresentam-se duas hipóteses para explicar a disparidade tão acentuada em relação aos resultados apresentados por Vilhena [4]. A primeira hipótese assenta sobre o facto de a unidade de controlo de pressão não ter aplicado a história de carga pretendida, sendo que a história de carga tem uma importância significativa no comportamento da ligação e, consequentemente, no resultado dos ensaios. A segunda

hipótese recai no facto de o sistema com um pré-esforço mais elevado atingir a fase plástica prematuramente quando sujeito a uma carga cíclica.

É importante referir que este tipo de ensaio não permite um grau elevado de controlo, dado existirem numerosos fatores que podem condicionar o comportamento de todo o sistema.

### **5.3 Desenvolvimentos futuros**

Conforme referido anteriormente, a queda de defletómetros inferiores ocorreu por diversas vezes durante a realização dos ensaios. Recomenda-se a fixação destes fora do sistema de ensaio, ou seja, de forma a que quando ocorra uma vibração ou um impacto não danifique ou cause a queda dos instrumentos.

Devido à elevada importância que o deslizamento do cordão tem na prestação deste sistema de ancoragem, sugere-se que, em estudos futuros, sejam utilizados cordões indentados (por exemplo Y1860 S7 15,7 l) ou barras de pré-esforço.

## Bibliografia

- [1] V. Lúcio, D. Faria, A. Ramos, e J. Ferreira, “Reabilitação estrutural de edifícios com pós-esforço”, em *Congreso Latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio: REHABEND 2014, Santander (España), 1-4 de abril de 2014*, 2014.
- [2] H. Muhaj, C. Marchão, V. Lúcio, e A. R. Gião, “Seismic strengthening of RC beams using post-tensioning with anchorages by bonding”, Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2018 LNEC – 7 a 9 de novembro de 2018
- [3] FCT UNL e Lúcio, V., "Sistema de Pós-Tensão com Ancoragens por Aderência para Estruturas de Betão", PT 103785 A, janeiro 2009.
- [4] T. Vilhena, “Estudo do comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência a ensaios monotónicos e cíclicos”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil FCT-UNL, 2018.
- [2] Doerr, G.; Cook, R.; Klingner, R., "Adhesive Anchors: Behavior and Spacing Requirements", Center for Transportation Research, Report 11262, University of Texas, Austin, 1989.
- [6] A. Ramos e V. Lúcio, “Apontamentos de Estruturas de Betão Armado II - Pré-esforço-Introdução,” FCT UNL, Lisboa, 2018.
- [7] A. Ramos, “Apontamentos de Estruturas de Betão Armado II - Pré-esforço-Materiais,” FCT UNL, Lisboa, 2008.
- [8] IPQ, "Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios", NP EN 1992-1-1, Lisboa, 2008.
- [9] S. P. Gross e N. H. Burns, “Transfer and Development Length Of 15.2 Mm (0.6 In.) Diameter Prestressing Strand in High Performance Concrete: Results of The Hoblitzell-Buckner Beam Tests”, Research Report 580-2, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas, Austin, p. 107, 1995.
- [10] Oh, B.; Kim, E.; Kim, K., "Correct Prediction of Transfer Lengths in Pretensioned Prestressed Concrete Structures", SMIRT 16, Paper N° 1545, Washington DC, pp. 1-8, 2001.
- [11] Chandler, I., “End zones of pretensioned prestressed concrete beams”, Tese de doutoramento, University of Melbourne, 1984.

- [12] Liong, P., "Transfer of Prestress by Pretensioned wire Tendons", Dissertação de Mestrado, Curtin University of Technology, 1993.
- [13] T. E. Cousins, D. W. Johnston, e P. Zia, "Transfer and Development Length of Epoxy Coated and Uncoated Prestressing Strand", *PCI J.*, vol. 35, n. 4, pp. 92–103, jul. 1990.
- [14] Zia, P., and Mostafa, T., "Development of Prestressing Strands," *PCI Journal*, Vol. 22, No. 5, 1977, pp. 54–65.
- [15] Kaar, P. H., LaFraugh, R. W., and Mass, M. A., "Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length," *PCI Journal*, Vol. 8, No. 5, 1963, pp. 47–67.
- [16] D. Mitchell, W. D. Cook, e T. Tham, "Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand", *PCI J.*, vol. 38, n. 3, pp. 52–66, 1993.
- [17] B. H. Oh, S. N. Lim, M. K. Lee, e S. W. Yoo, "Analysis and Prediction of Transfer Length in Pretensioned, Prestressed Concrete Members", *ACI Struct. J.*, vol. 111, n. 3, 2014.
- [18] B. Andrawes, M. Shin, e A. Pozolo, "Transfer and Development Length of Prestressing Tendons in Full-scale AASHTO Prestressed Concrete Girders using Self-Consolidating Concrete" Illinois Center for Transportation (ICT), Research Report ICT-09-038, University of Illinois, Urbana-Champaign p. 64, March 2009.
- [19] Burdette, E. G., Deatherage, J. H., and Chew, C. K., "Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Girders," *PCI Journal*, Vol. 39, No. 1, January/February 1994, pp. 70–83.
- [20] Russell, B. W., and Burns, N. H., Design Guidelines for Transfer, Development, and Debonding of Large Diameter Seven Wire Strands in Pretensioned Concrete Girders, Research Report 1210-5F, CTR, The University of Texas at Austin, January 1993.
- [21] Hanson, N. W., "Influence of Surface Roughness of Prestressing Strand in Bond Performance," *PCI Journal*, Vol. 14, No. 1, January/February 1969, pp. 32–45.
- [22] Federation Internationale du Béton, "Treatment of Imperfections in Precast Structures", Bulletin nº 41, 2007.
- [23] R. H. Evans e G. W. Robinson, "Bound Stresses in Prestressed Concrete from X-Ray Photographs.", *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 4, n. 2, pp. 212–235, Mar. 1955.
- [24] V. Briere, K. A. Harries, J. Kasan, e C. Hager, "Dilation behavior of seven-wire prestressing strand – The Hoyer effect", *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 650–658, 2013.



- [25] B. Hwan Oh, E. Sung Kim, e Y. Cheol Choi, "Theoretical Analysis of Transfer Lengths in Pretensioned Prestressed Concrete Members", *J. Eng. Mech.*, vol. 132, n. 10, pp. 1057–1066, out. 2006.
- [26] R. A. Cook, R. C. Konz, e D. S. Richardson, "Specifications for Adhesive-Bonded Anchors and Dowels", Department of Civil Engineering, University of Florida; Gainesville, FL, September 1996.
- [27] R. Cook, "Behavior of Chemically Bonded Anchors", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 119 N° 9, September 1993.
- [28] Cook, R. A Douglas, E.P, Davis, T.M "Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions" National Cooperative Highway Research Program, University of Florida, Gainesville, FL, 2009.
- [29] Cook, R.A, and P. Jain. "Effect of Coarse Aggregate on the Strength of Adhesive-Bonded Anchors". University of Florida; Gainesville, FL, 2005.
- [30] P. Cognard, "Chapter 2 Technical characteristics and testing methods for adhesives and sealants", em *Handbook of Adhesives and Sealants*, vol. 1, Elsevier, 2005, pp. 21–99.
- [31] Elgehausen, R.; Cook, R.; Appl, J., "Behaviour and Design of Adhesive Bonded Anchors", *ACI Journal*, Vol. 103, N° 6, pp. 822-831, novembro 2006.
- [32] Meszaros, J., "Tragverhalten Von Verbunddübeln Im Ungerissenen Und Gerissenen Beton", PhD Thesis, University of Stuttgart, 1999.
- [33] Lehr B.; "Tragverhalten von Verbunddübeln unter zentrischer Belastung im ungerissenen Beton – Gruppenbefestigungen und Befestigungen am Bauteilrand," Civil Engineering PhD Thesis, University of Stuttgart, 2003.
- [34] Daws, G., "Resin Anchors," Parts I and II, Civil Engineering (British), Morgan-Grampian Professional Press Ltd., outubro 1978, pp. 71-75, dezembro 1978, pp. 61-63.
- [35] R. M. Field, "Interim Report 1 and 2", *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 28, n. 3, p. 471, 1947.
- [36] Moreira G.; "Avaliação da Rigidez de Flexão de Ligações de Betão Armado Pré-Fabricado," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FCT-UNL, 2016.
- [37] D. M. V. Faria, "Reforço de Lajes de Betão Armado usando Pós-Tensão com Ancoragens por Aderência," Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT-UNL, 2011.

- [38] H. Inc, "HIT-RE 500 V3 - Ancoragem Química - Hilti Portugal". Disponível em: <https://www.hilti.pt>.
- [39] Edwards, A. D. and Yannopoulos, P. J., "Local Bond-Stress-Slip Relationship Under Repeated Loading," Magazine o/Concrete Research, Vol. 30, No. 103, June 1978.
- [40] Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V.V., "Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations", Earthquake Engineering Research Center, Report to the National Science Foundation, Report No. UCB/EERC-83/23, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, October 1983.
- [41] Goto, Y., "Cracks Formed in Concrete Around Tension Bars", ACI Journal, Proceedings, Vol. 68, No.4, April 1971.